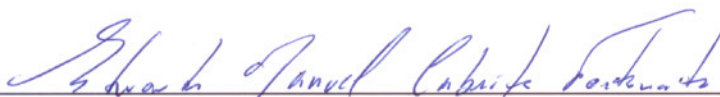


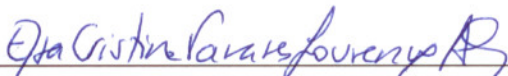
ESTABILIDADE DE GEOMATERIAIS EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS. PROPRIEDADES RELEVANTES E MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO

ISABEL ANTÓNIA SANTIAGO LOURO SANTOS

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA



Orientador: Professor Doutor Eduardo Manuel Cabrita Fortunato



Coorientador: Doutora Engenheira Elsa Cristina Tavares Lourenço Alves

JULHO DE 2013

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A minha Família

Só se conhece o que se pratica.

Baron de Montesquieu

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Eduardo Fortunato, pela disponibilidade, esclarecimento de dúvidas e orientação.

À minha coorientadora, Investigadora Elsa Alves, pela disponibilidade e ajuda prestada.

Aos meus amigos, em especial à Rita e ao Carneiro, pelo apoio, companheirismo e bons momentos passados ao longo do curso.

À Joana, pela amizade, apoio e palavras de incentivo, nos momentos mais importantes.

Ao Joce, por estar sempre presente, pelas palavras de apoio, paciência e incentivo em todos os momentos de insegurança.

À minha família, em especial aos meus pais e irmãos, pelo apoio incondicional em todas as minhas decisões. Por contribuírem para a pessoa que sou hoje, ensinando-me que nada se consegue sem empenho.

RESUMO

Esta dissertação tem como objetivo a avaliação da estabilidade de geomateriais em estradas não pavimentadas. Em muitos locais, estas infraestruturas são concebidas para permitir que a população possa aceder a bens e serviços. Para tal, necessitam de garantir boas condições de circulação para os utentes da via, fator crucial no desenvolvimento económico, social e cultural.

No dimensionamento de estradas não pavimentadas é necessário, numa fase de projeto, avaliar fatores como tráfego, aspetos climáticos e aspetos geotécnicos. Durante a construção é necessário garantir a utilização de materiais adequados, a execução de sistemas de drenagem apropriados e uma geometria de acordo com o projeto.

Para garantir um nível de qualidade que assegure condições de segurança, de conforto e de qualidade ambiental são necessárias medidas de manutenção. Para tal, existem métodos de avaliação e inspeção visual que identificam possíveis problemas bem como métodos para os solucionar. As medidas de manutenção devem ser tomadas para garantir boas condições de circulação, permitindo o aumento da vida útil da estrada.

Neste trabalho pretende-se fazer um levantamento das questões que mais condicionam a conceção e a operação das estradas não pavimentadas. Apresentam-se os métodos que têm vindo a ser utilizados em várias partes do mundo para o dimensionamento e para a análise do comportamento em serviço destas estruturas.

Atendendo a que em Portugal não existem métodos de dimensionamento próprios para este tipo de estradas, fizeram-se aplicações de alguns métodos apresentados, resultando num estudo paramétrico, de forma a demonstrar a influência de vários fatores nesse mesmo dimensionamento e no esforço de manutenção das estradas.

PALAVRAS-CHAVE: Estradas não pavimentadas, estabilidade de geomateriais, aspetos climáticos, aspetos geotécnicos, dimensionamento, manutenção.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the stability of geomaterials in unsealed roads. In many countries, these infrastructures are made to allow the population to access goods and services. For this, they need to ensure good traffic conditions for road users, which is a crucial factor in the economic, social and cultural development of a country.

In unsealed roads design it is needed, in the design phase, to evaluate factors such as traffic, climatic aspects and geotechnical aspects. During the construction it must be considered the kind of material to be used, the construction of appropriate drainage systems and the right geometry according to the project.

To guarantee a certain level of quality that ensures safety, comfort and environmental quality some maintenance measures must be taken. For this, there are some evaluation and visual inspection methods that identify possible problems as well as ways to solve them. The maintenance measures must be taken in order to guarantee good traffic conditions, allowing the increase of the road's useful life.

This study intends to make a survey about some questions that restrain the conception and operation of unsealed roads. There will be shown the methods that have been used in several places in the world for design and analysis of the behaviour of these structures in use.

Given that in Portugal there are no design methods for this kind of road, there were made applications of some presented methods, resulting in a parametric study, in order to prove the influence of several factors in the design and maintenance effort in roads.

KEYWORDS: Unsealed roads, stability of geomaterials, climatic aspects, geotechnical aspects, design, maintenance.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE QUADROS	XIII
ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS	XV
 1 INTRODUÇÃO	 1
1.1. ENQUADRAMENTO GERAL	1
1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO	1
 2 CONCEÇÃO E CONSTRUÇÃO DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS.....	 3
2.1. ASPETOS GERAIS	3
2.2. ESTUDOS DE BASE PARA O PROJETO.....	4
2.2.1. TRÁFEGO	4
2.2.2. ASPETOS GEOTÉCNICOS	5
2.2.3. ASPETOS CLIMÁTICOS	8
2.3. CONCEÇÃO	8
2.3.1. ASPETOS GEOMÉTRICOS	8
2.3.1.1. Perfil Longitudinal	8
2.3.1.2. Perfil Transversal.....	9
2.3.2. CAMADAS E GEOMATERIAIS UTILIZADOS	10
2.3.3. DRENAGEM	12
2.3.3.1. Drenagem Longitudinal.....	13
2.3.3.2. Drenagem Transversal	15
2.4. ASPETOS CONSTRUTIVOS	16
2.5. CONTROLO DA QUALIDADE DE CONSTRUÇÃO.....	18
2.5.1. CBR – CALIFORNIAN BEARING RATIO	18
2.5.2. PENETRÓMETRO DINÂMICO LIGEIRO	18
2.5.3. CARGA EM PLACA	19
2.5.4. DEFLETÓMETRO DE IMPACTO	20
2.6. MANUTENÇÃO	20

2.6.1.	INDICADORES DE DESEMPENHO	20
2.6.2.	DEFEITOS COMUNS.....	22
2.6.3.	RODEIRAS	23
2.6.4.	POEIRAS	24
2.6.5.	CREMALHEIRAS	24
2.6.6.	COVAS	25
2.6.7.	PERDA DE AGREGADOS.....	26

3 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO E DE PREVISÃO DO COMPORTAMENTO 27

3.1.	INTRODUÇÃO	27
3.2.	EUROPA	27
3.2.1.	REINO UNIDO	27
3.2.2.	PAÍSES NÓRDICOS	29
3.3.	ÁFRICA	30
3.3.1.	ÁFRICA DO SUL.....	30
3.3.2.	QUÊNIA	35
3.4.	AMÉRICA.....	36
3.4.1.	ESTADOS UNIDOS.....	36
3.4.2.	BRASIL	40
3.5.	OCEÂNIA	41
3.5.1.	NOVA ZELÂNDIA E AUSTRÁLIA.....	41
3.6.	OUTROS MÉTODOS	42
3.6.1.	BANCO MUNDIAL E ASSOCIAÇÃO MUNDIAL DE ESTRADAS.....	42
3.7.	COMPARAÇÃO DE MÉTODOS	43

4 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO E DE AVALIAÇÃO DOS DANOS 47

4.1.	ENQUADRAMENTO	47
4.2.	APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS ...	47
4.3.	APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE DANOS DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS	50
4.3.1.	PROFUNDIDADE DAS COVAS	50
4.3.2.	PERDA DE CASCALHO.....	51

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 55

5.1.	CONCLUSÕES.....	55
------	-----------------	----

5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	55
BIBLIOGRAFIA	57
ANEXOS	59
ANEXO I.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 - Perfil transversal da estrada: a) Perfil inclinado para o exterior; b) Perfil inclinado para o interior; c) Perfil em “V” invertido (Fortunato et al., 2013)	9
Fig. 2.2 - Esquema do perfil transversal tipo (adaptado do DOT, 2009)	10
Fig. 2.3 - Exemplo de sistema de drenagem: a) valeta com cobertura vegetal (Evans, 2005); b) revestimento com gabião e colchão (Santos, 2013)	13
Fig. 2.4 - Exemplo de um <i>ford</i> (adaptado de FSL, 2008).....	16
Fig. 2.5 - <i>Corduroy</i> sobre geossintético, Austrália (Kestler, 2009)	17
Fig. 2.6 - Comportamento dos solos da estrada à ação do geotêxtil (adaptado de Colorado State Forest Service, 2011)	17
Fig. 2.7 - Equipamento usado no ensaio CRB em laboratório (adaptado de Aimil, 2011)	18
Fig. 2.8 - Penetrômetro Dinâmico Ligeiro (adaptado de Du Plessis et al., 2009).	19
Fig. 2.9 - Ensaio de Carga em Placa (adaptado de Betoteste, 2009)	19
Fig. 2.10 - a) Equipamento do Defletômetro de Impacto Pesado; b) Equipamento do Defletômetro de Impacto Portátil (adaptado de Fortunato, 2012)	20
Fig. 2.11 - Exemplo de formação de poeira (Jornal da Cidade de Rio Claro, 2012)	24
Fig. 2.12 - Exemplo típico de cremalheira fixa (DOT, 2009)	25
Fig. 2.13 - Agregados soltos na superfície de desgaste (DOT, 2009).....	26
 Fig. 3.1 - Relação entre o produto de retração, coeficiente de granulométrico e desempenho ao desgaste de cascalhos grosseiros (adaptado de DOT, 2009)	31
Fig. 3.2 – Diagrama para obtenção de material com características adequadas (adaptado de DOT, 2009)	33
Fig. 3.3 - Exemplo de ábaco utilizado na determinação da espessura de cascalho segundo a AASHTO (USDT, 2000)	37
Fig. 3.4 - Ábaco para a determinação da espessura da camada de cascalho (adaptado de ARRB, 1998)	41
Fig. 3.5 - Influência de diferentes fatores nas irregularidades na estrada: a) Efeito da Topografia e do Tráfego; b) Efeito do Clima e do Tráfego; c) Efeito da Frequência e do Tráfego (HDM 4, 2000)	43
 Fig. 4.1- Espessura da camada de cascalho em função do tráfego para os diferentes tipos de fundação, com base no TRL (2003).....	49
Fig. 4.2 - Espessura da camada de cascalho em função do tráfego para os diferentes tipos de fundação e tipos de material, com base no método de Hammitt (1970)	49
Fig. 4.3 - Profundidade da cova em função do tráfego e do tipo de material (método proposto por Jones (1984))	51
Fig. 4.4 - Exemplo de curva granulométrica utilizada (Fortunato, 2012)	52
Fig. 4.5 – Relação entre o tráfego e a perda de cascalho ao fim de 7 anos com base no TRH20 (2009)	52
Fig. 4.6 - Relação entre o tráfego e a perda de cascalho nas três zonas com base no TRL (2003) ...	53

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Quantitativo de veículos por dia (VPD) para diferentes tipos de estradas de baixo volume de tráfego (adaptado de Ferreira, 2004)	4
Quadro 2.2 - Cascalho de boa qualidade sugerido no TRL (adaptado TRL, 2003)	5
Quadro 2.3 - Cascalho de boa qualidade sugerido no CSRA (adaptado TRL, 2003)	6
Quadro 2.4 – Características da plasticidade de cascalho para camada de desgaste (adaptado TRL, 2003)	6
Quadro 2.5 – Espessura recomendada para Tráfego Reduzido (adaptado do TRL, 2003).....	11
Quadro 2.6 - Espessura recomendada para Tráfego Médio (adaptado do TRL, 2003)	12
Quadro 2.7 - Distância máxima recomendada entre dispositivo de descarga lateral (Fortunato et. al, 2013)	14
Quadro 2.8 - Estimativa do IRI em função da velocidade de conforto.....	22
Quadro 2.9 - Estimativa do nível de serviço em função do IRI	22
 Quadro 3. 1 - Avaliação da condição da superfície da estrada de cascalho segundo Jamsa (adaptado de Ferreira, 2004).....	30
Quadro 3.2 - Especificações recomendadas para estradas não pavimentadas (adaptado de DOT, 2009)	31
Quadro 3.3 – Estimativa do Nível de Serviço em função do IRI (adaptado de DOT, 2009).....	33
Quadro 3.4 - Escala e classificação da condição da estrada segundo URCI (adaptado de Ferreira, 2004)	38
Quadro 3.5 - Avaliação da superfície da estrada não pavimentada segundo RSMS (adaptado de Ferreira,2004).....	39
Quadro 3.6 - Classificação dos defeitos da estrada segundo o método GPM (adaptado de Ferreira, 2004)	40
Quadro 3.7 - Quadro comparativo dos fatores que influenciam a perda de cascalho (van Zyl, Henderson e Uys, 2007)	44
Quadro 3.8 - Quadro comparativo dos fatores que influenciam a rugosidade (van Zyl, Henderson e Uys, 2007)	45

ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

i - inclinação (%)

t - toneladas

CBR - *Californian Bearing Ratio*

DIP - Defletómetro de Impacto Portátil

DPL - Penetrómetro Dinâmico Ligeiro

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

EC - Ensaio de Carga em Placa

ESAL - *Equivalent Single Axle* (carga equivalente de eixo simples)

FWD - *Falling Weight Deflectometer* (Defletómetro de Impacto Pesado)

GO - Estado de Goiás (Brasil)

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MS - Estado do Mato Grosso do Sul (Brasil)

MT - Estado do Mato Grosso (Brasil)

PCA - Perda de Cascalho Anual

PR - Estado do Paraná (Brasil)

RCS/DVI - *Road Condition Survey/Detailed Visual Inspection* (Avaliação da Condição da Estrada/Inspeção Visual Detalhada)

RSMS - *Road Surface Management System* (Sistema de Gestão da Superfície da Estrada)

SP - Estado de São Paulo (Brasil)

VPD - Veículo por dia

1 INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

As estradas não pavimentadas, também conhecidas como “estradas de terra”, resultam da evolução de caminhos e foram concebidas com o intuito de permitir a deslocação entre zonas rurais e urbanas, proporcionando à população o acesso a serviços de educação, saúde, lazer e comércio. O acesso a bens e serviços são assegurados pelo bom funcionamento de infraestruturas de transporte, permitindo desenvolvimentos ao nível económico, social e cultural do País.

Após a construção das estradas, deverão ser adotadas medidas de manutenção de modo a que estas estruturas propiciem boas condições de segurança e conforto na circulação, permitindo o aumento da sua vida útil e custos ao longo do ciclo de vida relativamente baixos.

Neste trabalho procede-se à análise das características das estradas não pavimentadas, em particular no que respeita ao seu dimensionamento e avaliação de danos, bem como às propriedades dos geomateriais que as constituem.

Para tal, analisam-se fatores considerados fundamentais, como por exemplo, o volume de tráfego diário, as condições climáticas, o tipo de material a utilizar, a espessura ideal para a camada de desgaste, a geometria transversal e longitudinal, o sistema de drenagem superficial e subterrâneo mais adequado.

Fez-se uma aplicação de diversos métodos de dimensionamento e de avaliação dos danos para estradas não pavimentadas, utilizados em vários países, de forma a analisar quais os resultados que é possível obter tendo em conta os materiais e as condições climáticas de Portugal.

1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos, fazendo-se neste primeiro uma breve síntese do tema abordar.

No segundo capítulo descrevem-se aspetos relevantes para a conceção e construção de estradas não pavimentadas. São referidos os aspetos relativos às solicitações, climáticos, geométricos, geotécnicos e construtivos, tendo sempre em atenção a relação custo-benefício. O controlo da qualidade é outra preocupação, para que haja menor necessidade de recorrer a medidas de manutenção. São elencados os problemas mais correntes nas estradas não pavimentadas.

No terceiro capítulo são mencionados alguns métodos utilizados para dimensionar este tipo de estradas em vários países. Serão também referidos métodos de avaliação dos danos existentes na superfície da estrada utilizados para solucionar esses defeitos e manter a estrada com um adequado desempenho.

No quarto capítulo faz-se um estudo paramétrico relativo às estradas não pavimentadas, recorrendo a diversos métodos de dimensionamento e de avaliação dos danos, tendo em conta as características climáticas e os materiais existentes em Portugal.

No quinto e último capítulo faz-se uma análise conclusiva do trabalho realizado e apresentam-se recomendações para trabalhos futuros nesta área.

2 CONCEÇÃO E CONSTRUÇÃO DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

2.1. ASPETOS GERAIS

As estradas não pavimentadas são infraestruturas de transporte que apresentam uma importância crucial para o desenvolvimento económico, social e cultural de qualquer País permitindo estabelecer ligações entre zonas rurais e urbanas de modo a satisfazer as necessidades humanas. Ao nível económico, a exploração dos setores primário, secundário e terciário facilitam à população o desenvolvimento da atividade agrícola e pecuária assim como o acesso a serviços como educação, saúde, lazer e comércio.

Questões como o tipo de material a utilizar, o sistema de drenagem superficial ou subterrâneo mais adequado, a espessura da camada ou o volume de tráfego diário influenciam os custos de construção. No entanto, custos iniciais mais elevados poderão posteriormente trazer benefícios, em termos de redução dos custos com a manutenção. Porém, quando estes fatores não são devidamente considerados no projeto, há dificuldade em manter as estradas em boas condições de circulação.

No que diz respeito aos custos iniciais, estes são inferiores aos das estradas pavimentadas. Para o cálculo destes custos deve-se considerar o facto de o material ter de ser transportado, por vezes longas distâncias, bem como a sua quantidade, o tipo de tráfego que a estrada irá suportar, o tipo de sistema de drenagem mais adequado às condições climáticas, etc.. O tipo de material a utilizar na superfície da estrada deverá estar disponível para a etapa posterior à construção visto que, este tipo de estradas requer manutenção constante e uso contínuo de recursos, o que leva, a longo prazo, a custos de manutenção elevados.

Como estas estradas requerem manutenção constante, torna-se difícil de estimar os custos a associados à sua conservação pois o conceito de manutenção está relacionado com a antecipação e identificação de possíveis problemas, antes mesmo de eles ocorrerem. Portanto, para garantir uma adequada manutenção é necessário que a superfície das estradas esteja regularizada, nivelada e sem indícios de problemas; que o sistema de drenagem esteja limpo e em perfeitas condições de funcionamento e que as árvores e vegetação estejam cortadas. A manutenção adequada permite o aumento da vida útil da estrada assim como a redução dos custos da manutenção e reabilitação a longo prazo.

Outro aspeto que está associado à qualidade da construção e manutenção da estrada são os custos de operação dos veículos, relacionados com as irregularidades ao longo da via, que afetam o seu desempenho. Também os aspetos ambientais e paisagísticos, relacionados com o enquadramento da via no meio ambiente e com a minimização do ruído provocado pelos veículos, devem ser devidamente equacionados.

2.2. ESTUDOS DE BASE PARA O PROJETO

2.2.1. TRÁFEGO

A severidade do tráfego que passa numa dada estrada está relacionada com o número e tipo de veículos que a utilizam. Muitas das estradas não pavimentadas são estradas de baixo volume de tráfego devido ao reduzido número de veículos que nelas circulam. O conceito de baixo volume de tráfego difere de país para país, como se constata pela análise do Quadro 2.1. Para além disso, o valor da carga adotado como referência para cálculo do número de eixos padrão é também variável.

Segundo uma investigação realizada na África do Sul, tanto os veículos ligeiros como os veículos pesados (eixos de 80kN) podem provocar danos similares à estrada, isto é, o dano causado pelo movimento rápido dum veículo ligeiro poderá ser tão ou mais prejudicial à estrada que o movimento lento dum veículo pesado. O movimento lento dum veículo pesado poderá ser benéfico à estrada na medida em que compacta a mesma, melhorando significativamente o seu desempenho. No entanto, a passagem de veículos pesados carregados, com condições climáticas pouco satisfatórias (como é o caso das chuvas) ou a passagem de veículos pesados sem carga a uma velocidade mais elevada, poderá provocar danos consideráveis, como a deterioração da superfície da estrada (DOT, 2009).

Quadro 2.1 - Quantitativo de veículos por dia (VPD) para diferentes tipos de estradas de baixo volume de tráfego (adaptado de Ferreira, 2004)

ESTUDOS / CLASSIFICAÇÃO		VPD	TIPO DE ESTRADAS
FHWA	Classe 1	<50	Sem tratamento superficial ou com solo granular ou superfície de solo com agregados
	Classe 2	Entre 50 e 400	Material granular selecionado ou solo estabilizado com agregados nas superfícies
Áustria – Estradas de Baixo Volume		<100	Estradas sem pavimentos com função de ligar vilas a centros ou fazendas ou pequenos vilarejos e as estradas de florestas
AASHTO	10.000 ESAL *	Mínimo de 25	Estrada de cascalho
	100.000 ESAL *	Máximo de 250	* ESAL – Equivalent Single Axle (carga equivalente de eixo simples) 18 Kip = 8.2 t \cong 9000kg de PBT.
Órgãos Rodoviários Estaduais do Brasil (PR, SP, GO, MT e MS)		Máximo de 200	Para estradas construídas com material de baixo custo
África do Sul		Máximo de 200	Para a maioria das estradas não pavimentadas, sendo que menos de 60 são veículos pesados.

2.2.2. ASPETOS GEOTÉCNICOS

Na construção de uma estrada não pavimentada um aspeto fundamental a considerar é o tipo e a qualidade do material a utilizar na camada de desgaste, pois vai influenciar o desempenho da estrada quando solicitada pelo tráfego. O material normalmente utilizado é o material local, caso apresente características adequadas. A camada construída deve estar devidamente nivelada e compactada, ou seja sem irregularidades, para que o tráfego circule em condições de conforto e segurança. Uma boa compactação permite uma maior durabilidade da estrada e menor frequência de manutenção e de formação de defeitos. Quando o material selecionado é heterogéneo, a colocação deverá ser de acordo com a qualidade, isto é, na camada superior ficam os solos com melhores características, pois serão estes que serão mais solicitados pelo tráfego.

A melhor solução para a superfície da estrada é a colocação de uma camada de material granular com dimensões adequadas que contenha uma quantidade suficiente de material fino, silte e argila, que permita “ligar materiais” através da compactação.

A colocação apenas de material granular proporcionará uma boa capacidade de suporte da estrada mas, como não tem “ligante”, o material será facilmente desagregado pela roda, por isso há necessidade de colocar uma quantidade adequada de finos. Caso seja colocada uma quantidade de finos superior à desejável, poderá haver deformação da estrada, nas épocas húmidas, tornando-a intransitável, e formação de poeira, em épocas muito secas (Fortunato et al., 2013).

Um exemplo de materiais que podem ser adotados para a superfície da estrada é o cascalho. Para que um cascalho seja considerado de boa qualidade deverá cumprir requisitos granulométricos e de plasticidade, como sugerem os elementos apresentados nos Quadros 2.2 a 2.4.

A adição de material fino varia consoante a zona de aplicação se trate de clima seco ou clima húmido. Em clima seco é desejável que haja uma maior quantidade de partículas de argila com o objetivo de ligar os agregados da superfície. O contrário acontece em climas húmidos, onde deverá haver uma menor quantidade de partículas de argila para que não ocorram covas excessivas e superfícies escorregadias (TRL, 2003).

Quadro 2.2 - Cascalho de boa qualidade sugerido no TRL (adaptado TRL, 2003)

Dimensão do peneiro (mm)	% passada (em massa)		
	Dimensão máxima das partículas (mm)		
	37,5	19,0	9,5
37,5	100	100	100
19,0	80-100	100	100
9,5	55-80	80-100	100
4,75	40-60	60-85	80-100
2,36	30-50	45-70	50-80
0,425	15-30	25-45	25-45
0,075	5-15	10-25	10-25

Quadro 2.3 - Cascalho de boa qualidade sugerido no CSRA (adaptado TRL, 2003)

Dimensão do peneiro (mm)	% passada (em massa)			
	Dimensão máxima das partículas (mm)			
	37,5	26,5	19,0	9,5
37,5	100	100	100	100
26,5	85-100	100	100	100
19,0	70-100	80-100	100	100
13,2	60-85	60-85	75-100	100
4,75	40-60	45-65	50-75	60-100
2,00*	25-45	30-50	35-55	45-70
0,425	15-40	15-40	18-45	25-50
0,075*	7-30	7-30	7-30	7-30

*Estes peneiros são os mais importantes.

Quadro 2.4 – Características da plasticidade de cascalho para camada de desgaste (adaptado TRL, 2003)

CLIMA	LIMITE DE LIQUIDEZ MÁXIMO *	ÍNDICE DE PLASTICIDADE	RETRAÇÃO LINEAR (%)
Tropical húmido	35	4-9	2-5
Tropical húmido sazonal	45	6-20	3-10
Árido e semiárido	55	15-30	8-15

*Podem aceitar-se valores superiores no caso de laterites.

No que diz respeito à aplicação do cascalho, este deve ser colocado por camadas, devidamente compactado e regado, sobre a camada de fundação. No caso de a espessura total ser elevada pode justificar-se colocar e compactar várias camadas. A rega só é necessária caso o solo não contenha o teor de humidade ótimo.

De notar que o cascalho não deve ser utilizado na camada de desgaste quando as zonas de empréstimo são escassas, aumentando as distâncias de transporte, o que se torna inviável do ponto de vista da análise custo/benefício, quando as condições meteorológicas são adversas (elevados valores de pluviosidade ou condições de seca prolongada) ou quando são escassos ou inexistentes meios de manutenção.

É relevante ainda mencionar que materiais com baixos índices de plasticidade (até cerca de 10%) facilitam a formação de ondulações (cremalheira) devido à falta de material ligante assim como a falta de compactação.

Em algumas circunstâncias utilizam-se materiais locais, mesmo não cumprindo os requisitos que estão definidos nas normas internacionais, a propósito da adequação de materiais para construção rodoviária. Exemplo disso é a utilização em camadas de superfície da estrada de solos lateríticos. A laterite é um material predominante em climas tropicais quentes e húmidos. Este material apresenta baixa expansibilidade e uma capacidade de retenção de água relativamente fraca, evitando a formação de poeiras e cremalheiras na estação seca, através do aumento dos limites inferiores de plasticidade. Os terrenos lateríticos contêm limites de consistência superiores aos recomendados nas classificações habitualmente utilizadas, mas quando aplicados na estrada apresentam reduzida tendência para formação de lamas (Fortunato et al., 2013).

O recurso a materiais com maior quantidade de finos, como as argilas ou siltes, na pavimentação das estradas, é algo pouco frequente pois a sua prestação não é a mais adequada. A fração fina deve apenas ser utilizada em pequenas proporções com o objetivo de ligar o material granular. Caso haja necessidade de utilizar material mais plástico, por ser economicamente mais vantajoso, e este não cumpra todas as características pretendidas, poderá recorrer-se ao seu melhoramento, por meio da adição de materiais que melhorem as suas propriedades.

O melhoramento dos materiais pode ser mecânico ou químico, utilizando ligantes, tais como cal, cimento, materiais betuminosos, cloretos, cinzas volantes, etc.. A seleção do tipo de ligante a utilizar depende do tipo de solo, da função da camada a estabilizar, do tipo de alteração que se pretende fazer, dos requisitos mecânicos e de durabilidade, das condições ambientais e de tráfego e dos custos que tal melhoramento poderá acarretar.

A cal, normalmente usada em solos com elevada plasticidade, é utilizada quando se pretende melhorar os solos, melhorando a sua trabalhabilidade ou reduzindo a sua sensibilidade à água, ou estabilizando-os, alterando significativamente características como a resistência mecânica, a deformabilidade, a durabilidade ou a permeabilidade. Dependendo do tratamento que se faz ao solo, a adição de teores em cal será diferente, isto é, poderá ser de 1 a 3% ou 5 a 10%, se o solo é melhorado ou estabilizado, respetivamente. A cal pode ser adicionada sob diferentes formas: cal aérea viva, apagada e leite de cal. Tanto a cal aérea viva com a apagada produzem alterações das características geotécnicas dos solos, aumentando a resistência e diminuindo a deformabilidade e o teor em água, sendo que, neste aspeto, a primeira é mais eficiente (Fortunato, 2012).

Relativamente à estabilização de solos com cimento, esta só é feita quando os solos têm características pouco plásticas. A sua utilização permite diminuir o teor em água dos solos, melhorar as características mecânicas e aumentar a estabilidade relativamente à variação do teor em água. A quantidade de cimento usada no tratamento pode ser muito variável, por exemplo, de 5 a 7% nos siltes, 7 a 15% nas areias e da ordem de 4% nos cascalhos (Fortunato, 2012).

Outro assunto que deve ser abordado na seleção de materiais é o fenómeno de erosão. A erosão é um fenómeno natural associado à desagregação das partículas provocadas pela passagem da água que, por sua vez, pode estar associada à drenagem inadequada. Este fenómeno de erosão pode ocorrer devido à falta de capacidade do material que constitui a superfície da estrada para resistir ao fluxo da água. Essa falta de propriedades coesivas poderá originar a formação de defeitos como a perda de cascalho, secção transversal imprópria, entre outras irregularidades na superfície da estrada. Uma consequência da erosão é o arrastamento das partículas desagregadas para os sistemas de drenagem o que implica uma manutenção de rotina (DOT, 2009).

2.2.3. ASPETOS CLIMÁTICOS

O dimensionamento das estradas não pavimentadas está intrinsecamente relacionado com os aspetos climáticos, os quais influenciam os fatores climatéricos. As estradas de terra tanto podem ser construídas em zonas equatoriais, onde os climas são tropicais quentes e húmidos, como em zonas nórdicas onde em determinadas épocas há neve. Os aspetos climáticos têm de ser considerados não só ao longo da vida útil da estrada mas também aquando da fase de construção da mesma.

Numa análise dos aspetos climáticos é preciso abordar variáveis como a pluviosidade, temperatura, vento e a relação gelo/degelo que, quando não consideradas, interferem no bom funcionamento da estrada.

A pluviosidade é uma questão crucial, pois esta potencia a formação de defeitos, que dependem do tipo de solo, da inclinação transversal e longitudinal e do sistema de drenagem da estrada. Usualmente, apenas se constroem estradas não revestidas em climas com pluviosidade máxima da ordem de 1500 a 2000mm. Valores de pluviosidade superiores, combinados com a ação do tráfego, dão origem ao aparecimento de defeitos graves e frequentes, conduzindo a elevados custos de manutenção, e que podem pôr em causa a funcionalidade da estrada. Por outro lado, em climas secos, dependendo do tipo de solos, podem formar-se nuvens de poeira.

A ação do vento pode interferir no bom funcionamento da estrada pois pode provocar o arrastamento de partículas soltas na superfície e provocar a erosão das partículas, com o auxílio da chuva.

A ação do gelo/degelo pode ter um efeito prejudicial nos solos. Em particular, em solos tratados a ação do gelo pode provocar a rotura das ligações entre partículas criadas pelo ligante, devido ao aumento de volume da água durante a solidificação. A ação do gelo provoca a degradação dos materiais por fragmentação ou microfissuração. A água existente no interior das fendas gela e degela provocando um aumento do seu volume em cerca de 10% quando passa ao estado sólido, dando origem a importantes tensões. Além dos danos na estrutura, no momento do degelo, em alguns solos, pode haver uma redução da capacidade de carga e, portanto, em países suscetíveis da ação gelo/degelo, é necessário considerar o risco associado a esse fenómeno na seleção do material (Fortunato, 2012).

2.3. CONCEÇÃO

2.3.1. ASPETOS GEOMÉTRICOS

2.3.1.1. Perfil Longitudinal

Uma estrada não pavimentada é caracterizada pela sua superfície permeável, pela suscetibilidade de arrastamento de materiais em períodos de elevada precipitação, pela maior dificuldade de escoamento de águas superficiais e pela utilização de maiores inclinações transversais. Portanto, na conceção de uma estrada é necessário atender aos aspetos relacionados com a sua geometria, analisando as condições locais, por forma a adotar o melhor traçado possível.

De acordo com os aspetos referidos, o traçado da estrada terá um perfil longitudinal o mais adaptado possível ao relevo da região mas sem utilizar elevadas pendentes longitudinais, assegurando boas condições de visibilidade, enquadramento no meio ambiente, sistema de drenagem adequado e tendo sempre especial atenção aos custos de construção e manutenção.

No que concerne ao cascalho, este não deve ser colocado quando a estrada tem inclinação longitudinal superior a 6% em zonas onde há abundante precipitação, pois a água da chuva poderá causar a erosão da superfície da estrada (TRL, 2003).

2.3.1.2. Perfil Transversal

Os elementos que integram o perfil transversal da estrada são a via, as bermas, as valetas e os taludes, conforme a figura 2.2. À semelhança do que foi referido em relação ao perfil longitudinal, o perfil transversal tem de garantir segurança na circulação e um sistema de drenagem adequado à situação em causa.

A via tem de ter largura e inclinação suficientes que permitam a passagem de veículos em segurança. A largura adotada, em função do volume de tráfego, poderá variar entre 4 a 7 m. A inclinação transversal recomendada varia entre 3 a 6% (DOT, 2009); quando se trata de uma camada de cascalho compactado poderá ser 3% em climas secos e de 5 a 7% em climas húmidos (TRL, 2003). Neste último caso a água poderá causar erosão das partículas devido à inclinação bastante acentuada. No caso de se tratar de uma superfície composta por solos argilosos, as inclinações a adotar serão sensivelmente superiores às anteriormente referidas.

É de notar que a pendente da via será criada antes da colocação da camada de desgaste, mais propriamente na camada de fundação, de acordo com o solo da camada superior. A criação da pendente é feita a partir do eixo da estrada.

Com o objetivo de drenar as águas superficiais da estrada, a via poderá apresentar três perfis diferentes tendo em conta o local onde está inserida. Os perfis, conforme ilustrado na figura 2.1, poderão ser: inclinado para o exterior, para promover o escoamento da água, minimizar a largura da estrada e evitar a necessidade de drenagem transversal; inclinado para o interior, para possibilitar um maior controlo da água à superfície da estrada, pois concentra a água, implicando a necessidade de um sistema de valas, drenos transversais e uma maior largura da estrada por causa das valas; e em “V” invertido, usualmente adotado em estradas de classe superior, com duas faixas de rodagem e declives suaves, necessitando de um sistema de valas e drenos transversais.

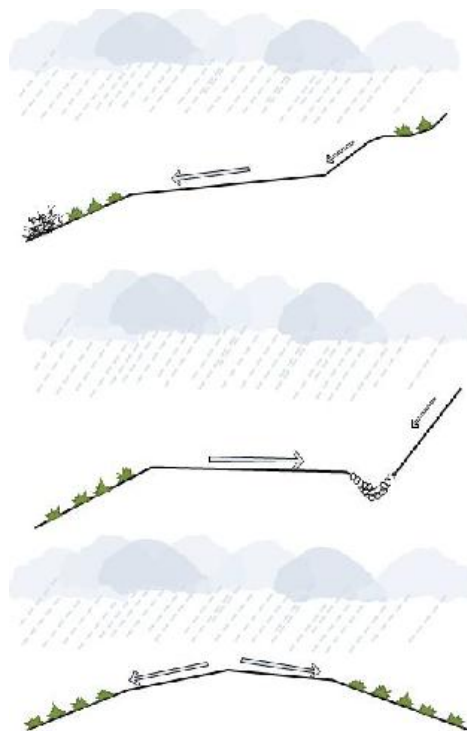


Fig. 2.1 - Perfil transversal da estrada: a) Perfil inclinado para o exterior; b) Perfil inclinado para o interior; c) Perfil em “V” invertido (Fortunato et al., 2013)

Relativamente às bermas, estas ajudam a garantir um bom funcionamento do sistema de drenagem, juntamente com as valetas, através da adoção de inclinações transversais das bermas sensivelmente superiores às da via, facilitando a drenagem superficial e evitando a acumulação de água na via. As bermas podem ser revestidas ou não, sendo que o material que se aplica tem de ser adequado à importância da estrada, à probabilidade de os veículos circularem sobre a berma e aos materiais disponíveis para a manutenção, em caso de erosão. No que diz respeito à drenagem, se as valetas forem revestidas com vegetação irão fornecer uma maior proteção da via contra a ação da água.

As valetas serão abordadas adiante no capítulo reservado à drenagem.

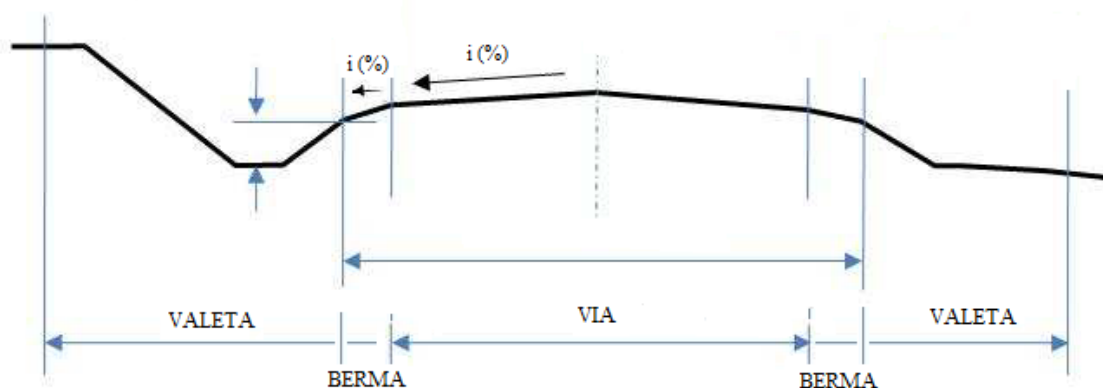


Fig. 2.2 - Esquema do perfil transversal tipo (adaptado do DOT, 2009)

2.3.2. CAMADAS E GEOMATERIAIS UTILIZADOS

Posteriormente à seleção do tipo de material a utilizar, adequado ao local onde está inserido, às condições climáticas e ao tráfego médio diário, procede-se à definição da espessura da camada de material a utilizar na superfície da estrada. A estrutura da estrada está dividida em três camadas: a de desgaste, a de base e a de fundação. É de notar que, tanto a camada de desgaste como a camada de base poderão ser compostas pelo mesmo material, cascalho ou solo, no caso da camada de fundação ser de boa qualidade e o tráfego ser ligeiro.

Na determinação da espessura apropriada da camada estará implícito a frequência de recarga do material, ou seja os anos que o material aguentará sem que seja repostado um material novo; a estimativa da perda de material ao longo desse período; a avaliação das características do material e espessura mínima permitida de modo a assegurar a capacidade de suporte da estrada. Essa espessura mínima terá que considerar além da perda de material esperada, a espessura padrão selecionada adequada ao tipo de material escolhido. A mínima espessura recomendada para a camada compactada é de 100 mm, enquanto a espessura máxima recomendada é de 200 mm. Para camadas superiores a 200 mm deverá ser feita, de forma faseada, a colocação do material e posterior compactação. A espessura da camada compactada deve, contudo, ser sempre superior a 1,5 vezes o tamanho máximo das partículas (DOT, 2009).

A espessura padrão da camada a colocar varia em função do tipo de material selecionado para a camada e do tipo de solo da fundação. Por exemplo, tratando-se de camada composta por areias argilosas lateríticas, a espessura mais conveniente será 150 mm sobre solos de qualidade média e 200 a 300 mm sobre solos menos bons, ou em zonas de nível freático mais elevado (Fortunato, 2013).

Segundo o TRL (2003), caso o material escolhido para colocar diretamente sobre o solo existente seja o cascalho, a espessura da camada terá de 150 mm a 300 mm, sendo que a espessura máxima compactada da camada será 150 mm. A seleção do cascalho como camada do pavimento tem vantagens, tais como o seu bom desempenho em zonas tropicais e subtropicais (locais onde este tipo de material abunda), o seu baixo custo inicial relativamente a outras opções de pavimentação, e o facto de ser usada como superfície intermédia aquando da fase de construção. Além das vantagens enunciadas, este material também apresenta desvantagens como o desgaste do cascalho, sendo essencial existir um programa de manutenção sustentado para substituição do cascalho; os custos elevados com a manutenção, especialmente na reaplicação do cascalho; poluição causada pela poeira em clima seco. Tendo em conta o que foi acima referido, o manual sugere valores para as espessuras de estradas de baixo volume de tráfego (quadros 2.5 e 2.6), considerando uma profundidade de sulcos, depressões na superfície, com 40 mm.

Quadro 2.5 – Espessura recomendada para Tráfego Reduzido (adaptado do TRL, 2003)

TRÁFEGO REDUZIDO – essencialmente não motorizado e inferior a 25 veículos motorizados/dia, com poucos veículos pesados	Espessura recomendada do pavimento de cascalho/laterite compactada	
	Baixa pluviosidade (menos de 1500mm/ano e pouca poeira na estação seca)	Elevada pluviosidade (mais de 1500mm/ano, ou estação seca prolongada e considerável poeira na estação seca)
Fundação resistente		
CBR in situ > 15		
(poucos danos do tráfego se a estrada tem inclinações adequadas para a drenagem)	12 cm *	15 cm
Fundação média		
CBR in situ = 5 a 15	17 cm	20 cm
Fundação fraca		
CBR < 5	23 cm	26 cm
(danos sérios do tráfego na época das chuvas, mesmo se a estrada é adequadamente reperfilada para a drenagem)	(de considerar também outro tipo de superfície)	(de considerar também outro tipo de superfície)

* O solo existente pode ser suficientemente resistente para suportar o tráfego ligeiro, se a superfície da estrada for regularmente reperfilada para drenar a água da chuva - por conseguinte, o cascalho pode não ser necessário.

Quadro 2.6 - Espessura recomendada para Tráfego Médio (adaptado do TRL, 2003)

TRÁFEGO MÉDIO – até 100 veículos motorizados/dia, incluindo até 20 veículos de carga média (10t)	Espessura recomendada do pavimento de cascalho/laterite compactada	
	Baixa pluviosidade (menos de 1500mm/ano e pouca poeira na estação seca)	Elevada pluviosidade (mais de 1500mm/ano, ou estação seca prolongada e considerável poeira na estação seca)
Fundação resistente CBR in situ >15	20 cm	25 cm *
Fundação média CBR in situ = 5 a 15	27 cm *	32 cm *
Fundação fraca CBR <5	>30 cm *	>30 cm *

* de considerar também outro tipo de superfície.

De salientar que é possível considerar para a camada de desgaste antes da reaplicação do cascalho, para baixa ou elevada pluviosidade, respetivamente, 2 cm ou 5 cm, no caso de tráfego reduzido, e 5 cm ou 10 cm, no caso de tráfego médio.

2.3.3. DRENAGEM

As estradas não pavimentadas são infraestruturas de transporte que estão particularmente expostas às condições climáticas assim como ao tráfego. Um modo de preservar a estrada de condições adversas será garantir que esta tem um bom sistema de drenagem associado. O objetivo do sistema de drenagem é garantir a remoção rápida da água da plataforma de forma a evitar problemas de erosão ou até mesmo perda da capacidade de suporte, e assegurar a circulação de veículos em segurança.

A influência da eficiência do sistema de drenagem no dimensionamento das estruturas de pavimentos já é considerada por métodos consagrados como, por exemplo, o da AASHTO.

No dimensionamento do sistema de drenagem, é necessário conhecer a pluviosidade da zona em estudo, o tráfego existente e as características fisiográficas e de ocupação do solo.

Um sistema de drenagem é constituído por dispositivos superficiais e subterrâneos sendo que os dispositivos superficiais se destinam a intercetar as águas que chegam ao corpo da estrada provenientes de zonas adjacentes e a captar as águas provenientes das chuvas conduzindo-as para local onde irão desaguar. Já os dispositivos subterrâneos servem para captar as águas subterrâneas provenientes de lençóis de água que poderão causar instabilidade do leito da estrada.

Na drenagem superficial são utilizados dispositivos quer longitudinais quer transversais adequados para que não haja acumulação de águas que danifiquem a estrutura da estrada garantindo segurança de circulação.

Tal como na drenagem superficial, na drenagem subterrânea também são utilizados dispositivos longitudinais e transversais para controlo das águas subterrâneas evitando que estas acedam ao pavimento e reduzam a capacidade de suporte dos solos.

Além dos dispositivos de drenagem superficial e subterrânea, o tipo de material utilizado na estrada terá de ser drenante bem como terá de ser considerada a inclinação transversal na ordem dos 3 a 6% para facilitar o escoamento das águas. Câmaras de visitas, de derivação ou ligação e dispositivos de entradas ou saídas são acessórios necessários e que, juntamente com drenagem longitudinal e transversal completam o sistema de drenagem.

A manutenção periódica destes dispositivos terá de ser também considerada pois é um fator determinante para o bom funcionamento do sistema de drenagem. A manutenção inclui a remoção de materiais alojados nos canais, no corte de vegetação, permitindo que não haja consequências como perda da capacidade de vazão dos canais, devido ao aumento da sua rugosidade.

2.3.3.1. Drenagem Longitudinal

Os dispositivos de drenagem superficial longitudinal devem ser dimensionados de forma a garantir a sua eficiência hidráulica através da captação e escoamento da água proveniente da via e zonas adjacentes sem a afetar, a facilidade de manutenção e o seu enquadramento estético no meio ambiente. Os dispositivos geralmente utilizados são valas, valetas e canais que poderão ser revestidos ou não revestidos. Em caso de revestimento, poderão ser utilizados revestimentos flexíveis conforme figuras 2.3.a e 2.3.b, tais como cobertura vegetal, enrocamento, gabião, colchão reno, ou revestimento rígido como por exemplo o betão. Os revestimentos flexíveis são as soluções que melhor se enquadram no meio ambiente e as mais utilizadas neste tipo de estradas. O recurso ao revestimento em betão pode constituir a solução técnica mais eficiente do ponto de vista hidráulica mas é menos utilizada em estradas não revestidas devido aos custos associados (Fortunato et al., 2013).



Fig. 2.3 - Exemplo de sistema de drenagem: a) valeta com cobertura vegetal (Evans, 2005); b) revestimento com gabião e colchão (António Santos, 2013)

Para o dimensionamento destes dispositivos é necessário determinar o caudal de ponta, por exemplo, através da fórmula racional (2.1), considerando uma duração da chuvada não superior a 10 min e um período de retorno adequado. Com base na forma da secção transversal do dispositivo, da sua dimensão, inclinação e rugosidade determina-se a capacidade de vazão utilizando, por exemplo, a fórmula de Manning-Strickler (2.2). Deverá ser verificado se a velocidade do escoamento não induz potenciais fenómenos de erosão. Por fim, deverão ser analisados os pontos de descarga.

É de salientar que na aplicação da fórmula racional ao dimensionamento de dispositivos de drenagem longitudinal, o valor de A significa a área da superfície da plataforma e dos taludes contribuintes.

$$Q_p = C \cdot i \cdot A \quad (2.1)$$

$$Q = \frac{1}{n} A \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2} \quad (2.2)$$

em que:

Q_p - Caudal de ponta (m^3/s)

C - Coeficiente de escoamento

i - Intensidade média de precipitação (m/s) associados ao período de retorno

A - Área da superfície da plataforma (m^2)

Q - Caudal de dimensionamento (m^3/s)

n - Coeficiente de rugosidade

A - Área molhada (m^2)

R - Perímetro molhado (m)

J - Declive da linha de energia (m/m)

Os pontos de descarga lateral permitem captar a água que é transportada nos canais e valas, sem que haja transbordamento. São recomendadas distâncias máximas entre dispositivos, tendo em conta o declive da estrada e a erodibilidade do solo.

Quadro 2.7 - Distância máxima recomendada entre dispositivo de descarga lateral (Fortunato et. al, 2013)

DECLIVE DA ESTRADA (%)	DISTÂNCIA (m)	DISTÂNCIA NO CASO DE DESCARGA PARA TERRAS AGRÍCOLAS (m)
12	40	20 a 50 (Sempre que possível para zonas entre limites de terras agrícolas)
10	80	
8	120	
6	160	
4	200	
1-2	50*	

*No caso da ocorrência de risco de deposição de sedimentos.

Os dispositivos de drenagem subterrânea longitudinal utilizados são os drenos longitudinais, constituídos por filtros e drenos introduzidos numa vala profunda preenchida com material drenante, que são colocados a uma profundidade mínima de 1,50 m com o objetivo de rebaixar do nível freático para que não cause danos ao pavimento. Para a seleção da dimensão do material do filtro tem que se estabelecer uma relação com a dimensão dos furos dos tubos de drenagem para que não haja acesso de finos do solo.

2.3.3.2. Drenagem Transversal

Os dispositivos de drenagem superficial transversal utilizados são as condutas e passagens hidráulicas que permitem recolher as águas provenientes da drenagem longitudinal, conduzindo-as para pontos de descarga final, e estabelecer o escoamento natural dos cursos de água. O seu dimensionamento é feito tendo em conta aspetos como o caudal de ponta, as condições de escoamento relacionadas com as formas da secção de entrada, secção transversal, comprimento e inclinação da conduta e a definição do tipo de material e a sua geometria. Deve-se ter especial atenção às velocidades de escoamento a jusante da conduta de forma a minimizar as erosões e garantir a estabilidade da mesma. A fórmula utilizada para o cálculo do caudal de ponta é a mesma que na drenagem superficial longitudinal sendo que, neste caso, o valor de A representa a área da bacia hidrográfica, o coeficiente C deve atender às características da bacia, e a duração da chuvada é igual ao tempo de concentração que pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$t_c = 5,476 \frac{n^{0,8} \cdot L^{0,8}}{p_2^{0,5} J^{0,2}} \quad (2.3)$$

em que:

t_c - Tempo de concentração (min)

n - Coeficiente de rugosidade

L - Extensão do percurso do escoamento (m)

P_2 - Precipitação em 24 horas para o período de retorno de 2 anos (mm)

J - Declive da linha de energia (m/m)

Além de recolher as águas provenientes da drenagem longitudinal, as passagens hidráulicas devem ser concebidas de forma a minimizar as alterações introduzidas nas linhas de água e evitar o estrangulamento da largura do leito de cheia.

Uma solução frequentemente utilizada em zonas florestais, mais especificamente em locais onde há passagem de linhas de água, é uma estrutura denominada por *ford* conforme ilustra a figura 2.4. O *ford* forma uma travessia baixa num curso de água permitindo o atravessamento de veículos e a passagem do escoamento, ou o galgamento da própria estrutura, em situações de cheia (Fortunato et al., 2013). Para a sua conceção recorre-se a materiais resistentes à erosão, como cascalho ou betão, que são colocados no leito do rio. Aconselha-se o uso de sinalização adequada para reduzir o risco de acidentes e não permitir a sua utilização quando o nível da água for muito elevado (Ryan et al., 2004).

Os dispositivos de drenagem subterrânea transversal utilizados são as condutas e os drenos transversais, normalmente dispostos em espinha, e só são instalados quando os drenos longitudinais não são suficientes para recolher as águas de infiltração.



Fig. 2.4 - Exemplo de um *ford* (adaptado de FSL, 2008)

2.4. ASPETOS CONSTRUTIVOS

Um projeto de estradas não pavimentadas requer que sejam considerados para a sua execução um conjunto de fatores. Normalmente, a preocupação fundamental na sua execução é garantir que a camada de material selecionado é suficiente para proteger a fundação de deformações causadas pelo tráfego, e adequada para que os utentes da estradas se desloquem em condições de segurança e conforto. É essencial assegurar, aquando da construção de uma estrada, que a preparação da fundação, a colocação e compactação do material de boa qualidade e a disposição do sistema de drenagem é cuidadosamente supervisionada e controlada para garantir o bom desempenho da estrada. Para satisfazer todos os requisitos acima referidos é preciso que a estrada tenha boas características estruturais e funcionais.

As características estruturais referem-se à capacidade da estrutura suportar o tráfego em condições de segurança, economia e conforto adequadas. Para tal, é fundamental analisar a fundação e a estrutura do pavimento e o comportamento mecânico dos materiais que a constituem, para que se possa minimizar a probabilidade de aparecimento de danos, numa fase precoce.

As características funcionais estão relacionadas com a geometria do traçado, a aderência e a capacidade de drenagem das águas superficiais, evitando problemas como irregularidades superficiais, má aderência devido à existência de gravilhas soltas ou, no tempo chuvoso, drenagem inadequada.

Para além da utilização tradicional de solos ou cascalhos em estradas não pavimentadas, o recurso a outros sistemas ou soluções, como ramos, troncos ou geossintéticos, irá depender do local onde estiver inserida, ou da necessidade de melhoramento da fundação.

Um dos sistemas de estabilização de estradas utilizado em zonas florestais com vista a melhorar a sua capacidade estrutural é o *corduroy*. Este é um método simples, natural e bastante económico pois a estabilização do pavimento é feita com recurso a galhos e troncos de árvores, colocados sobre a fundação, que funcionam como base de uma camada de desgaste. Os troncos, que formam uma malha, poderão ser colocados na direção da marcha ou transversalmente, conforme ilustrado na figura 2.5.



Fig. 2.5 - Corduroy sobre geossintético, Austrália (Kestler, 2009)

No processo construtivo das estradas não pavimentadas, por vezes, recorre-se ao reforço das mesmas utilizando geossintéticos. Os geossintéticos podem ser usados como elemento de separação entre o material existente no local da camada de fundação e o material importado para a camada de desgaste (fig. 2.6). No caso da utilização como elemento de separação, a camada de desgaste não deverá ter espessura inferior a 100 mm para que a roda não contacte com o geossintético. Além de elemento de separação, eles podem ser utilizados como dreno, juntamente com a utilização de agregados mais grossos, permitindo que a água possa escoar sem danificar a estrada.

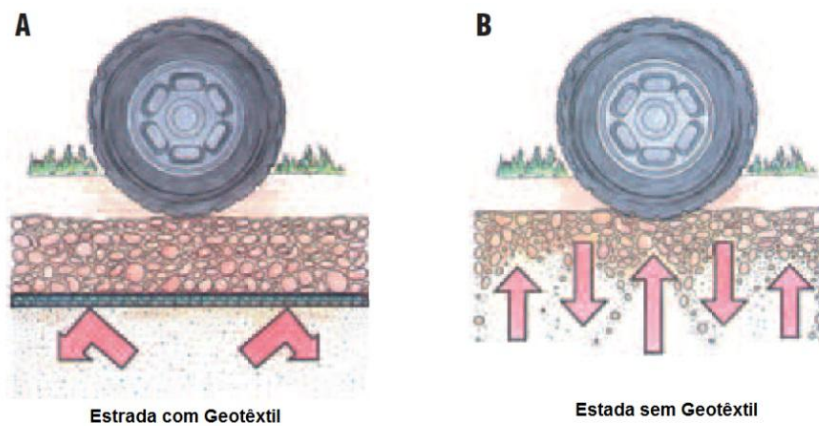


Fig. 2.6 - Comportamento dos solos da estrada à ação do geotêxtil (adaptado de Colorado State Forest Service, 2011)

2.5. CONTROLO DA QUALIDADE DE CONSTRUÇÃO

2.5.1. CBR – CALIFORNIAN BEARING RATIO

O ensaio Californian Bearing Ratio (CBR), cujo equipamento é apresentado na figura 2.7, consiste na medição da resistência de materiais através da relação entre a força necessária para penetrar com um pistão normalizado numa dado terreno e a força necessária para uma penetração idêntica num solo padrão, sob determinadas condições, de acordo com a norma LNEC E198-1967. Com este ensaio determina-se um índice CBR, que pode ser obtido em laboratório ou *in situ*.

Os valores obtidos neste ensaio são importantes no dimensionamento das infraestruturas de transporte e na seleção de materiais a utilizar pois será através destes valores, por exemplo, que se classificarão os solos de fundação para determinação da espessura de camada a utilizar de modo a que ela tenha capacidade para suportar as solicitações do tráfego.



Fig. 2.7 - Equipamento usado no ensaio CRB em laboratório (adaptado de Aimil, 2011)

2.5.2. PENETRÓMETRO DINÂMICO LIGEIRO

No ensaio com o Penetrómetro Dinâmico Ligeiro (PDL), faz-se a determinação do número de pancadas aplicadas por um pilão em queda livre, a uma altura constante, sobre um batente, necessárias para penetrar no solo, uma dada profundidade, uma ponteira cónica associada a um trem de varas.

O PDL permite determinar a resistência à penetração em profundidade, sendo utilizado em todo o mundo devido à sua simplicidade de utilização, permitindo realizar ensaios de forma rápida e a baixo custo.

É bastante apropriado para terrenos brandos e para profundidades até à dezena de metros. Em solos arenosos têm-se revelado bastante útil no controlo da compactação de aterros para infraestruturas de transportes, em conjugação com o ensaio de Carga em Placa (Matos Fernandes, 2011).

A utilização do PDL *in situ* permite a verificação das características mecânicas da fundação. Na figura 2.8 apresenta-se um aspeto de um tipo de equipamento que pode ser utilizado no ensaio.



Fig. 2.8 - Penetrômetro Dinâmico Ligeiro (adaptado de Du Plessis et al., 2009).

2.5.3. CARGA EM PLACA

O ensaio de Carga em Placa (ECP) consiste na aplicação de uma pressão, através de uma placa circular, na superfície do terreno a ensaiar, medindo os assentamentos resultantes. O equipamento consiste numa célula de força para medição da carga aplicada, um sistema de um ou mais defletómetros para medição dos deslocamentos da placa e uma estrutura de referência para apoio à medição dos assentamentos, conforme ilustrado na figura 2.9.

O ECP é um ensaio de campo que assume grande importância na caracterização da qualidade da fundação de pavimentos rodoviários, sendo usado para avaliar a capacidade de carga e a deformabilidade das camadas que compõem a estrutura da estrada. Da análise dos resultados pode-se retirar dois módulos de deformabilidade designados por EV_1 e EV_2 , que correspondem ao 1º e 2º carregamento do ensaio de carga, respetivamente. De entre os módulos obtidos, o mais utilizado na análise estrutural é o EV_2 (Pereira, 2010).



Fig. 2.9 - Ensaio de Carga em Placa (adaptado de Betoteste, 2009)

2.5.4. DEFLETÓMETRO DE IMPACTO

O Defletómetro de Impacto pode ser de dois tipos: o pesado (FWD - Falling Weight Deflectometer) (fig. 2.10 a)) e o portátil (DIP) (fig. 2.10 b)), que funcionam com o mesmo princípio.

O FWD tem como finalidade a caracterização estrutural e avaliação da capacidade de carga de pavimentos por meio de um sistema mecânico que, através de uma placa circular com 300 ou 400 mm, exerce uma força de impulso gerada pela queda de uma massa a uma dada altura sobre um conjunto de amortecedores, resultando daí deformações verticais na superfície ensaiada. O ensaio é de fácil e rápida execução (Pereira, 2010).

O DIP funciona com o mesmo princípio do FWD sendo que a placa de carga a aplicar tem menores dimensões (100 mm, 200 mm ou 300 mm), a massa a aplicar também é menor, assim como a altura de queda. Este ensaio tem como vantagens, comparativamente com FWD, o facto de ser portátil (mais fácil de transportar) e de fácil operação (Pereira, 2010).



Fig. 2.10 - a) Equipamento do Defletómetro de Impacto Pesado; b) Equipamento do Defletómetro de Impacto Portátil (adaptado de Fortunato, 2012)

2.6. MANUTENÇÃO

2.6.1. INDICADORES DE DESEMPENHO

Uma estrada não pavimentada constituída por uma camada de cascalho na sua superfície pode ser uma solução com muitas exigências de manutenção devido à perda de material. A perda de material da superfície provocada pelo tráfego e pelas condições climáticas, tais como vento e chuva, é uma situação inevitável e a sua reposição torna-se uma operação de manutenção muito dispendiosa. A taxa de perda de cascalho está relacionada com o tráfego, a precipitação e com as propriedades dos materiais. Apesar do principal contribuinte para a perda de cascalho ser o tráfego, uma redução significativa de perda de cascalho pode ocorrer se se proceder à colocação de materiais com granulometria seleccionada e plasticidade relativamente elevada, tendo em conta a variação dos índices de plasticidade no cascalho.

Segundo o TRH 20 (DOT, 2009), uma fórmula para o cálculo da perda anual de cascalho (PCA) foi proposta com base no método convencional de Paige-Green (1989) onde inclui fatores como o tráfego

médio diário (ADT), o coeficiente de Weinert (N), a percentagem de passados no peneiro 26,5 mm (P26), a percentagem de passados no peneiro 0,075 mm (PF) e o limite de plasticidade (equação 2.5). De salientar que a classificação é normalizada para 100% de passados no peneiro 37,5 mm. O índice N necessita para o seu cálculo de dados como a precipitação média anual, temperatura média do ar e velocidade média do vento para o mês em causa. O coeficiente de Weinert relaciona-se com as características de desgaste do material, sendo $N < 5$ no caso de decomposição, onde domina a resistência química, e $N > 5$ no caso de desintegração, onde domina a resistência física.

$$PCA = 3,65 \cdot [ADT \cdot (0,059 + 0,0027 \cdot N - 0,0006 \cdot P26) - 0,367 \cdot N - 0,0014 \cdot PF + 0,0474 \cdot P26] \quad (2.5)$$

Esta equação fornece a espessura total de material perdido pela erosão e pela ação abrasiva do tráfego.

Além da fórmula proposta pelo TRH 20 (DOT, 2009), também existem fórmulas propostas pelo TRL e PIARC-World Bank (HDM 4). Na fórmula proposta pelo TRL (equação 2.6), a perda anual de cascalho (PCA) relaciona-se com o tipo de material (contemplado no fator f), com o volume de tráfego anual (TA), com a precipitação anual (RF) e com o gradiente geométrico da estrada (GR).

$$PCA = [TA^2 / (TA^2 + 50)] \cdot (4,2 + 0,092 \cdot TA + 3,5 \cdot RF^2 + 0,188 \cdot GR) \cdot f \quad (2.6)$$

No que se refere ao tipo de material, o fator f assume os seguintes valores:

Laterite $f=1,3$;

Quartzito $f=1,5$;

Rocha vulcânica $f=0,96$;

Coral $f=1,5$;

Arenito $f=1,4$;

Calcarenito $f=2,0 - 4,5$.

Já em relação à fórmula proposta pela PIARC-World Bank (HDM 4) (equação 2.7), os parâmetros considerados são o coeficiente de arranque induzido pelo tráfego (KT), o tráfego diário médio anual (AADT), a precipitação média mensal (MMP), a inclinação média da estrada (RF), a curvatura horizontal média da estrada (HC), o índice de plasticidade do material (PI), o fator de calibração para a perda de material (K_{gl}), o fator de calibração do coeficiente de arranque induzido pelo tráfego (K_{kt}) e a quantidade de material passado no peneiro 0,075 mm (P075).

$$PCA = K_{gl} \cdot 3,65 \cdot [3,46 + 0,246 \cdot (MMP/1000) \cdot (RF) + (KT)(AADT)] \quad (2.7)$$

$$KT = K_{kt} \cdot \max \left[\begin{array}{l} 0,022 + 0,969 \cdot (HC/57300) + 0,00342 \cdot (MMP/1000) \cdot (P075) \\ -0,0092 \cdot (MMP/1000) \cdot (PI) - 0,101(MMP/1000) \end{array} \right] \quad (2.8)$$

A escolha do material adequado ao tráfego e às condições climáticas permite obter resultados de perda de cascalho relativamente baixos, o que possibilita poupanças nos custos de utilização e de manutenção das estradas.

Um outro dano que é importante analisar é a rugosidade, que consiste em irregularidades na superfície do pavimento que afetam a qualidade e segurança de circulação dos veículos. Segundo o Banco

Mundial, a rugosidade da estrada é um fator crucial na análise da relação existente entre a qualidade da estrada e os custos para o utente, que poderá ser quantificada pelo índice *Present Serviceability Rating* (PSR) ou pelo *International Roughness Index* (IRI). O PSR baseia-se num teste quantitativo onde se observa a capacidade de uma estrada de servir o tráfego a que se destina. Esta análise varia de 5 a 0, ou seja, de excelente a essencialmente intransponível, respetivamente (Highway Research Board, 1962).

Relativamente ao IRI, este índice é uma medição padronizada da rugosidade que se destina a medir a suavidade do pavimento e determinar fatores de custo para a construção de novas estradas e projetos de reabilitação. A medição da suavidade do pavimento é conseguida mediante um modelo de análise do movimento vertical de um veículo a 50 km/h ao longo do perfil longitudinal de uma estrada. Este modelo é conhecido como “*Golden Car*” e para fazer uso pleno dos valores daí retirados é necessário saber a localização dos registos, para que possa ser identificada a causa e consequente reparo do problema. Uma razão para a corrente utilização deste índice é o facto de ser usado com vista, não só a monitorização da condição do pavimento, mas também na manutenção e programação da reabilitação. Na impossibilidade de determinar o índice IRI diretamente, este pode ser estimado em função da velocidade de conforto (DOT, 2009), de forma a obter-se uma estimativa do nível de serviço, conforme referido nos quadros 2.8 e 2.9.

Quadro 2.8 - Estimativa do IRI em função da velocidade de conforto

ÍNDICE IRI	VELOCIDADE DE CONFORTO(km/h)
15	<35
12,5	45
10	60
7,5	80
5	>100

Quadro 2.9 - Estimativa do nível de serviço em função do IRI

NÍVEL DE SERVIÇO	ÍNDICE DE IRI (m/km)	NÃO TRANSITÁVEL
5	15	Frequentemente
4	11	<5 dias/ano
3	9	Nunca
2	8	Nunca
1	6	Nunca

2.6.2. DEFEITOS COMUNS

As estradas não pavimentadas estão mais vulneráveis a fatores externos como o tráfego e as condições climáticas que as estradas pavimentadas. Esses fatores, juntamente com o tipo de solo selecionado, o

sistema de drenagem e a geometria da estrada, poderão causar problemas tanto estruturais como funcionais na superfície da estrada, afetando as condições de circulação. Os problemas estruturais referem-se à incapacidade da estrutura para suportar o tráfego em condições adequadas enquanto que os problemas funcionais são essencialmente defeitos superficiais resultantes da má seleção de materiais e de processos construtivos. Esses problemas estão relacionados com deformações, com a diminuição da capacidade de suporte do solo e com a modificação dos perfis longitudinais e transversais. Os tipos de defeitos mais comuns são:

- secção transversal imprópria;
- drenagem inadequada;
- cremalheira;
- excesso de poeira;
- covas;
- rodeiras,
- perda de agregados.

No que diz respeito à secção transversal imprópria, esta consiste na falta de inclinação transversal da superfície, manifestada através de grandes depressões na zona das rodas, impossibilitando que a água seja direcionada para as valetas. A água que escoar ao longo da superfície da estrada provoca erosão do pavimento devido, por exemplo, a intensidade da chuva. Este defeito pode ser identificado, medido e avaliado quanto à extensão e severidade (baixa, média e elevada), com base num trabalho desenvolvido por Eaton et al. (1987) (Ferreira, 2004).

Relativamente à drenagem inadequada, esta é manifestada através da acumulação de água na plataforma pelo facto de existir um mau funcionamento do sistema de drenagem, pela falta de manutenção dos dispositivos e pela inexistência de dispositivos relevantes para o escoamento da água. A falta de manutenção poderá consistir na existência de vegetação ou entulho a impedir que a água seja direcionada e transportada pela valeta, provocando o empoçamento da estrada. Tal como o defeito anterior, também a drenagem pode ser avaliada e classificada de acordo com os níveis de severidade sendo que baixa é quando existem pequenas quantidades de água acumuladas na valeta sem que haja vegetação ou entulho, e elevada é quando existem grandes quantidades de água nas valetas porque as valetas estão cheias de entulhos ou vegetação, o que irá provocar erosão da zona interior da valeta.

2.6.3. RODEIRAS

A rodeira, classificada como um problema funcional, é caracterizada pela formação de depressões longitudinais ao longo da via, resultando na deformação permanente da camada devido a passagens sucessivas das rodas dos veículos. A baixa capacidade de suporte do material que constitui a estrada ou a ineficiência do sistema de drenagem ou a falta de manutenção podem também estar na origem da formação de rodeiras.

A profundidade das rodeiras varia com o tráfego e com as condições climáticas e podem ser avaliadas como sendo de severidade baixa se a profundidade da rodeira for menor que 2,50 cm e se a superfície da estrada tiver coberta com menos de 10% de sulcos. A severidade elevada ocorre se a profundidade da rodeira for maior que 7,50 cm e se a superfície da estrada tiver coberta com mais de 30% de sulcos (Eaton et al., 1987).

2.6.4. POEIRAS

A poeira consiste na formação de uma nuvem de pó devido à perda da fração fina de partículas, conforme representa a figura 2.11. Este problema funcional ocorre devido a vários fatores como, por exemplo, a velocidade de circulação dos veículos e as propriedades dos materiais constituintes da estrada (como por exemplo o teor de humidade). A formação de poeira é mais evidente em estradas constituídas por solos argilosos que arenosos sendo benéfico, em certos casos, a aplicação de paliativos da poeira com o objetivo de ligar as partículas de pó.

O problema da poeira não está só relacionado com a questão da segurança de circulação mas também com questões ambientais. Para que esse problema seja minimizado existem métodos de tratamento, tais como a aplicação de paliativos da poeira, que permitem reduzir a quantidade de poeira e auxiliar na manutenção da estrada. Para uma maior eficácia da aplicação de paliativos de poeira é necessário que a estrada esteja em boas condições, ou seja, que a secção transversal seja apropriada, que exista um sistema de drenagem adequado, uma boa mistura de agregados e boa compactação da superfície da estrada. De acordo com o tipo de material, a quantidade de tráfego e as condições climáticas é atribuído um agente de tratamento de modo a controlar a poeira, entre os quais: cloreto de cálcio, produtos asfálticos, polímeros sintéticos, aditivos de argila e aditivos químicos (Ferreira, 2004).

Segundo Eaton et al. (1987), a quantidade de pó é determinada pela dimensão da nuvem de poeira causada pela passagem de um veículo a 40 km/h e, conseqüente, pela redução na visibilidade. Sendo assim, a formação da poeira pode ser classificada como baixa, para uma nuvem pouco densa que não obstrui a visibilidade, como média, caso a visibilidade seja parcialmente obstruída por uma nuvem densa causando tráfego lento, e como elevada, caso a visibilidade seja severamente obstruída por uma nuvem muito densa causando tráfego lento ou parado.



Fig. 2.11 - Exemplo de formação de poeira (Jornal da Cidade de Rio Claro, 2012)

2.6.5. CREMALHEIRAS

A formação de cremalheiras também consiste num defeito funcional que, à semelhança das rodeiras, se identificam pela formação de ondas na direção transversal, resultantes da passagem de veículos (fig. 2.12). O baixo índice de plasticidade do material ou até mesmo da falta de compactação, contribuem para a formação de cremalheira.

Existem dois tipos de cremalheiras: soltas e fixas. As cremalheiras soltas consistem na formação de ondulações de material composto por areia fina solta. Já as cremalheiras fixas consistem em ondulações de material composto por areia fina compactada.

Um modo de remover as depressões causadas pelo contacto da roda com o solo pode ser através de niveladora, em solos soltos, e através de escarificação e posterior espalhamento e compactação, em solos mais compactos. A manutenção frequente é um processo importante para que o estado das ondulações não evolua negativamente, condicionando o conforto de circulação (DOT, 2009).

Tal como nas rodeiras, a profundidade das cremalheiras pode ser avaliada como sendo: severidade baixa se a profundidade da cremalheira for menor que 2,50 cm e se a superfície da estrada tiver coberta com menos de 10% de ondulações. A severidade elevada ocorre se a profundidade da cremalheira for maior que 7,50 cm e se a superfície da estrada tiver coberta com mais de 30% de ondulações.



Fig. 2.12 - Exemplo típico de cremalheira fixa (DOT, 2009)

2.6.6. COVAS

As covas, também designadas por buracos, desenvolvem-se quando há libertação de partículas sólidas do leito, devido à contínua passagem de veículos em locais onde existe acumulação de água na via. Essa acumulação de água ocorre em zonas planas, sem inclinação transversal e nem sistema de drenagem adequado que permita o escoamento dessa água. A formação de covas poderá dever-se também à deformação de leitos ou camadas de desgaste fracos, à evolução da fissuração nas estradas (por causa da excessiva plasticidade), à fraca compactação, à má definição da forma da estrada, etc..

A formação de covas desenvolve-se como resultado de um suporte inadequado (defeito estrutural) ou má qualidade do material, mas a má manutenção e drenagem podem também contribuir para o fenómeno.

A ampliação da cova ocorre da contínua passagem dos veículos e consequente remoção do material, sem que este seja reparado. A sua reparação apresenta alguns problemas sendo que uma manutenção de rotina, por vezes, não é suficiente para resolver o problema. Para uma reparação dum buraco com eficácia é necessário ampliar e afundar o buraco, enchê-lo com cascalho húmido e fazer uma compactação do material por camadas (DOT, 2009).

No que concerne à classificação das covas, estas podem ser avaliadas com severidade baixa se a profundidade da cova for menor que 5 cm e com diâmetro máximo de 60 cm. A severidade média ocorre quando a profundidade da cova é entre 5 e 10 cm e o diâmetro máximo de 60 cm. A severidade elevada ocorre se a profundidade da cova for maior que 10 cm para diâmetro igual ou superior a 90 cm (Eaton et al., 1987).

2.6.7. PERDA DE AGREGADOS

A perda de agregados consiste na formação de cordões laterais e no centro da via provocada pela ação do tráfego (fig. 2.13). Esses cordões são compostos por partículas granulares soltas, que foram criados fora da zona de passagem das rodas dos veículos. Este tipo de defeito funcional ocorre, normalmente, em zonas de solo muito argiloso, com rampas acentuadas, em que foi acrescentado material granular sem compactação adequada mas, também pode ocorrer em terrenos planos onde há falta de material fino ligante.

A perda de agregados é um dos poucos defeitos das estradas que pode ser controlado. O seu controlo pode ser conseguido através da remoção de partículas de grandes dimensões ou na redução da dimensão das partículas existentes. Caso o controlo não seja conseguido, este defeito poderá afetar a manutenção e a qualidade da estrada, através dos agregados incorporados na camada de desgaste, e a segurança de circulação do veículo, através dos agregados soltos na superfície da estrada. As estradas num estado mais avançado de perda de agregados podem proporcionar outros tipos de problemas como estradas desnecessariamente rugosas, dificuldade de manutenção, desenvolvimento de cremalheiras, presença de materiais de grandes dimensões, etc. (DOT, 2009).

Segundo Eaton et al. (1987), as estradas não pavimentadas podem ser avaliadas quanto ao nível de severidade da perda de agregados sendo que, severidade baixa é quando os agregados estão soltos na superfície da estrada ou existe um cordão de agregados com menos de 5 cm de altura e existe menos de 10% da área total da superfície da estrada coberta de agregados soltos. A severidade média ocorre quando os agregados soltos formam um cordão de agregados com 5 a 10 cm de altura e existe entre 10% a 30% da área total da superfície da estrada coberta de agregados soltos. A severidade alta ocorre quando os agregados soltos formam uma berma de agregados com altura superior a 10 cm e existe mais de 30% da área total da superfície da estrada coberta de agregados soltos.



Fig. 2.13 - Agregados soltos na superfície de desgaste (DOT, 2009)

3 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO E DE PREVISÃO DO COMPORTAMENTO

3.1. INTRODUÇÃO

Após uma abordagem dos principais fatores a considerar na concepção e construção de estradas não pavimentadas, no presente capítulo faz-se referência a métodos de dimensionamento e de previsão do comportamento de estradas não pavimentadas desenvolvidos em alguns países.

Os métodos de dimensionamento abordados são maioritariamente para estradas de cascalho, tendo sido estabelecidos considerando as características dos países onde foram desenvolvidos. Em alguns casos a versatilidade dos métodos permite que, além de poderem ser aplicados no próprio país, seja possível aplicá-los noutros locais.

Além de métodos de dimensionamento, também são abordados métodos de avaliação de danos da estrada, tendo em conta a formação de defeitos provocados pelo tráfego e pelas condições climáticas, os quais afetam a qualidade e a segurança da circulação dos veículos.

Os defeitos formados na superfície da estrada podem ser avaliados por meio de inspeção visual ou por estimativa, tendo em conta as características do material, no sentido de estimar as quantidades que será necessário repor na camada de superfície aquando da manutenção periódica.

3.2. EUROPA

3.2.1. REINO UNIDO

No Reino Unido foi desenvolvido um projeto de investigação, financiado pelo TRRL (*Transport and Road Research Laboratory*), que disponibiliza métodos de dimensionamento e de avaliação dos danos, desenvolvidos para garantir o acesso básico em países economicamente em desenvolvimento, tendo em conta a experiência existente em África e na Ásia.

No dimensionamento da estrada, é preciso ter em atenção algumas variáveis de projeto, tal como a espessura da estrutura, que terá de ser suficiente para permitir uma adequada transferência de carga para a fundação. Para a determinação dessa espessura, vários métodos propõem que se considere o valor de CBR dos solos da fundação.

Considerando como critério de rotura a formação de rodeiras com 40 mm de profundidade, a espessura da camada de cascalho em estradas de baixo volume de tráfego, tipicamente entre 150 a 400 mm, pode

ser determinada com base na equação 3.1. Deve-se ter especial atenção nas características da fundação pois poderá implicar uma considerável variação nos resultados obtidos (TRL, 2003).

$$\log N_{40} = \frac{h(\text{CBR})^{0,63}}{190} - 0,24 \quad (3.1)$$

em que:

N – número de eixos padrão de 80 kN

h – espessura do material granular (mm)

CBR – CBR (%) *in situ* da fundação

Tal como referido no capítulo anterior, vários fatores influenciam a perda de cascalho na superfície da estrada, tais como, à ação da chuva, do tráfego, as características do material, os aspetos geométricos, a compactação e a manutenção. Essa perda pode ser estimada a partir da equação 2.6 apresentada no capítulo anterior, que permite prever a quantidade de perda de cascalho anual para dadas condições. Os parâmetros a utilizar devem refletir as condições de cada país. É de notar que os valores obtidos através desta equação são uma mera previsão, devendo ainda considerar-se a experiência existente em cada local.

O processo associado à perda de cascalho e, consequentemente, à recarga de material, é um processo dispendioso, visto que exige uma manutenção regular.

Para a determinação da rugosidade da estrada, o TRL (1999) utiliza um veículo que, estando devidamente equipado, faz um levantamento das irregularidades através do movimento do próprio veículo. Após o levantamento, os resultados são convertidos, utilizando as equações (3.2 e 3.3), fazendo uma estimativa da grandeza de IRI. Esta é uma medida padronizada que se destina a medir a rugosidade do pavimento.

$$VR = \frac{BI \times 10}{L} \quad (3.2)$$

em que:

VR - Resposta do veículo (mm/km)

BI – Medição unidirecional da irregularidade (cm)

L – Comprimento da seção (km)

$$E(\text{IRI}) = a + b \cdot VR + c \cdot VR^2 \quad (3.3)$$

em que:

E(IRI) - Estimativa de IRI (m/km)

a, b, c - constantes

Para avaliação das condições superficiais das estradas não pavimentadas utiliza-se no Reino Unido um método composto por dois níveis de inspeção: *Road Condition Survey* (RCS) e *Detailed Visual Inspection* (DVI). O objetivo do RCS é recolher dados sobre as condições da estrada, identificando as seções e as subseções da estrada que se encontram em estado crítico e que necessitam de manutenção. O objetivo do DVI é registar o tipo, a densidade e a severidade do defeito para posterior determinação do defeito e aplicação da medida mais adequada. Este método avalia os defeitos existentes na estrada

de forma objetiva, classificando o seu nível de serviço em baixo, médio e alto. O defeito é medido numa escala que varia entre 1 a 5. Dadas as características do método, este poderá ser utilizado noutros países (Ferreira, 2004).

O processo de seleção de métodos de manutenção adequados deve ter em conta: os elementos de projeto, construção e manutenção existentes; o levantamento das irregularidades na superfície da estrada e condições de tráfego; os resultados de ensaios nos materiais.

3.2.2. PAÍSES NÓRDICOS

Alguns países situados no norte da Europa, tais como a Finlândia, a Suécia, a Noruega e a Escócia, têm vindo a desenvolver um projeto comum, designado por *Roadex* (Roadex, 2013), com o objetivo de investigar problemas relativos a estradas de baixo volume de tráfego e desenvolver as técnicas mais adequadas para proceder à sua manutenção.

Os países que foram considerados possuem uma considerável percentagem de estradas não pavimentadas, provavelmente devido ao facto de estes países apostarem na indústria florestal, onde, por exemplo, a Finlândia tem cerca de 34% da rede rodoviária, a Suécia tem cerca de 38%, a Noruega tem cerca de 16% e a Escócia tem cerca de 42%.

Nos países acima referidos não existe nenhum método específico para proceder ao dimensionamento deste tipo estradas, no entanto, existem cuidados a ter, principalmente no que refere à manutenção e reabilitação da estrada.

Mudanças sazonais, ciclos de gelo/degelo e os danos que estes causam são fatores que afetam a condição da estrada e, portanto, têm de ser considerados. A ação do degelo é um fator que ocorre na Primavera e provoca maiores danos na superfície da estrada, principalmente, a redução da capacidade de suporte. Para analisar esse fenómeno, o *Roadex* desenvolveu um projeto denominado *Roadex III*, onde se abordam as medidas de construção e reparação que necessitam de ser tomadas nas estradas que são afetadas pelo degelo.

No desenvolvimento destes estudos constatou-se que em todos os projetos de reabilitação de estradas, a solução estrutural adotada era sempre a mesma, e que esta solução não era adequada a todos os casos existentes, visto que o fenómeno do degelo acarreta mecanismos muito específicos. Portanto, as soluções a adotar deverão ter em consideração o diagnóstico feito à zona danificada. O processo de reabilitação de troços afetados pelo degelo é um processo com duração de 2 a 4 anos, não terminando após as primeiras intervenções. A reabilitação é um processo que envolve manutenção periódica e monitorização, avaliando o possível aparecimento de novos danos bem como as medidas a tomar para os reparar. A recolha de dados de monitorização é muito importante pois dará informações valiosas sobre as diferentes soluções de reabilitação e a adequação dos métodos aos diferentes danos (Aho et al., 2006).

Numa fase inicial do processo de reabilitação é necessário uma análise das condições estruturais da estrada, obtidas através de ensaios *in situ*, e uma avaliação visual das condições da estrada, nomeadamente, dos sistemas de drenagem existentes e dos danos ocorridos na superfície, para que o processo adotado seja o mais adequado.

Na Suécia a análise é feita recorrendo a *Roadscanners* que são veículos devidamente equipados e que permitem avaliar a superfície relativamente aos danos ocorridos devido ao degelo, recolhendo informações sobre cada tipo específico de defeito ocorrido em cada troço de estrada. Os dados recolhidos são posteriormente tratados em programas adequados (Aho et al., 2006).

Adotando, por exemplo, uma estrada de cascalho, o processo de reabilitação é idêntico ao já referido, tornando-se relativamente simples quando a causa do dano é bem definida. A medida de reabilitação mais adequada deve ser selecionada após o diagnóstico do problema. Os métodos mais utilizados de reabilitação em estradas de cascalho são a remoção da camada de desgaste para posterior execução de aterro homogêneo, colocação de geotêxteis ou filtros, reparação de bermas, estabilização de solos, isolamento do solo em relação ao gelo, entre outros (Aho et al., 2006).

De salientar que, a eficácia do sistema de drenagem é muito importante para um adequado desempenho da estrutura reabilitada pois, caso não reúna as condições necessárias, deverá ser feita uma melhoria do sistema, em simultâneo com a reabilitação da estrada, ou então antecipar a manutenção como medida de prevenção.

Um outro método de avaliação utilizado foi proposto por Jamsa (1983) (Ferreira, 2004) e tem como objetivo avaliar as condições da superfície da estrada. Este método é utilizado na Finlândia e consiste na avaliação da superfície da estrada atribuindo-lhe uma nota numa escala de 0 a 5 e, consoante essa nota, define-se quando a estrada requer manutenção, conforme ilustra o quadro 3.1 (Ferreira, 2004).

Quadro 3. 1 - Avaliação da condição da superfície da estrada de cascalho segundo Jamsa (adaptado de Ferreira, 2004)

AVALIAÇÃO	CONDIÇÃO
4.1 – 5.0	Superfície da estrada manteve a sua forma; possível irregularidade de superfície mas que não afeta o conforto das viagens.
3.1 – 4.0	Superfície da estrada manteve a sua forma; algumas covas isoladas aqui e ali; nenhum pó; a velocidade é mantida, apesar da irregularidade.
2.1 – 3.0	A superfície de estrada manteve a sua forma; pequenas covas e irregularidades locais; presença de pó; covas e pontos irregulares podem ser evitados, ou a velocidade de circulação pode ser mantida; necessário adotar velocidade mais baixa para dar passagem, para a ultrapassagem ou para aproximação de veículos.
1.1 – 2.0	A forma da seção transversal da estrada pode ter mudado um pouco; algumas cremalheiras na superfície; irregularidades locais marcadas com sinais de trânsito; pó moderado; às vezes é necessária velocidade mais baixa e devem ser evitados pontos irregulares.
0.1 – 1.0	A forma da seção transversal da estrada mudou em vários pontos; superfície está irregular devido a covas e cremalheiras; irregularidades na estrada que não podem ser evitadas; bastante pó; superfície da estrada deve ser constantemente assistida e frequente variação na velocidade.

3.3. ÁFRICA

3.3.1. ÁFRICA DO SUL

As estradas não pavimentadas têm um papel fundamental no desenvolvimento económico, sendo necessário que estejam em boas condições para que garantam o bom funcionamento de setores industriais e agrícolas. No caso da África do Sul, as estradas não pavimentadas correspondem a cerca de 80% da rede rodoviária, pelo que existe uma vasta experiência na utilização de técnicas de manutenção com o objetivo de reduzir a formação de defeitos, como a perda de cascalho, poeira, drenagem inadequada, entre outros (DOT, 2009).

As estradas não pavimentadas na África do Sul são construídas de acordo com as especificações indicadas no TRH 20 (DOT, 2009), as quais são ajustadas consoante as condições existentes na zona em análise, conforme ilustra o quadro 3.2 e a figura 3.1.

Quadro 3.2 - Especificações recomendadas para estradas não pavimentadas (adaptado de DOT, 2009)

	RURAIS	URBANAS	TRÁFEGO PESADO (minas e florestas)
Dimensão máxima (mm)	37,5	37,5	50
Índice de sobretamanhos (I_o)^a (%)	≤ 5	0	≤ 5
Produto de Retração (S_p)^b	100 - 365	100 - 240	100 - 365
Coefficiente granulométrico (G_c)^c	16 - 34	16 - 34	16 - 34
CBR embebido (95% Proctor Mod. ASSHTO) (%)	≥ 15	≥ 15	≥ 18
Valor de Impacto Treton (%)	20 - 65	20 - 65	20 - 65

a) I_o = Índice de sobretamanhos (% retida no #37,5mm)

b) S_p = Produto de retração = Retração linear × (%<0,425mm)

c) G_c = Coeficiente granulométrico = (%<26,5mm - %<2,0mm) × (%<4,75mm) / 100

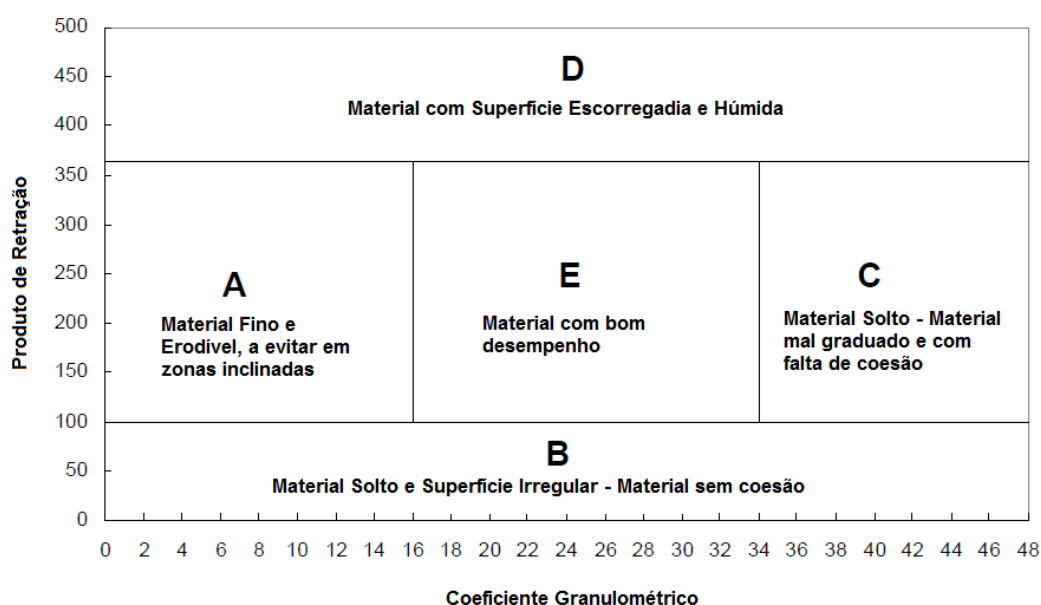


Fig. 3.1 - Relação entre o produto de retração, coeficiente de granulométrico e desempenho ao desgaste de cascalhos grosseiros (adaptado de DOT, 2009)

Geralmente, os materiais selecionados para as camadas, tanto de desgaste como de suporte, são materiais existentes no local. Estes materiais devem ser bem compactados para que garantam uma capacidade de suporte adequada durante alguns anos. Na fase de projeto, a determinação da espessura

da camada de desgaste, que está relacionada com as características do material, depende do cálculo da taxa de perda de cascalho, da frequência de recarga de material e da espessura mínima necessária para evitar deterioração da camada estrutural (DOT, 2009).

A espessura da camada de desgaste é determinada com base na frequência de recarga de material adequada num determinado período, comumente 7 a 10 anos, e no cálculo da perda de cascalho nesse mesmo período (DOT, 2009).

O cálculo da perda de cascalho para um dado período é feito com base na equação 2.5, referida no capítulo anterior, tendo em conta o tráfego médio diário, as características do material e a precipitação média anual existente na África do Sul.

Outro fator que é necessário calcular aquando da seleção do material é a estimativa de formação de poeira (equação 3.4) porque esse tipo de defeito afeta o conforto e segurança dos utentes na via. Segundo as especificações, a estimativa de formação de poeira deve conduzir a materiais com valores de produto de retração inferiores a 240 (quadro 3.2), para que se obtenha um índice que contabiliza a formação de poeira (equação 3.4) inferior a zero ($D < 0$), o que traduz a quantidade de poeira considerada aceitável pela população (DOT, 2009).

$$D = 20,88 - 0,32 \cdot (PI) + 1,24 \cdot (BLS) - 0,04 \cdot (P075) + 0,01 \cdot (AIV) - 9,05 \cdot (RD) \quad (3.4)$$

em que:

PI - índice de plasticidade

BLS - retração linear

P075 - percentagem de material passado no peneiro 0,075 mm

AIV - valor do ensaio de impacto (Aggregate Impact Value)

RD - densidade relativa

Para a obtenção do produto de retração desejado poderá ser necessário, por vezes, melhorar o material que irá ser utilizado. A melhoria desse material poderá ser conseguida através da mistura com outro material com propriedades diferentes, como a plasticidade ou o tamanho das partículas. Esse procedimento implica a movimentação e transporte de material, mas é economicamente mais vantajoso do que transportar grandes quantidades de material com melhores características. Para a obtenção da mistura ideal recorre-se a um diagrama que relaciona as percentagens de silte e argila ($< 0,075$ mm), de areia (0,075 mm - 2,0 mm) e de cascalho (2,0 mm - 37,5 mm) necessárias. A mistura ideal deverá estar dentro da área delimitada na figura 3.2 (DOT, 2009).

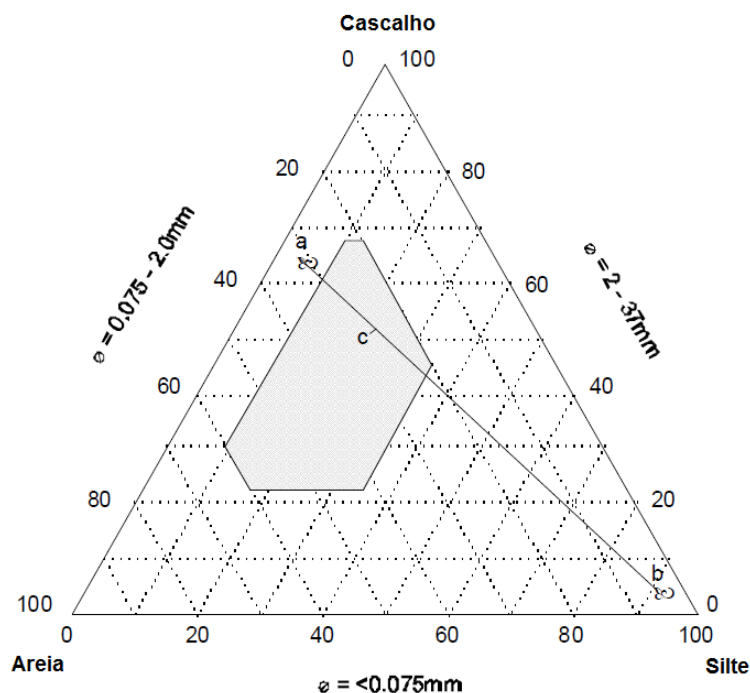


Fig. 3.2 – Diagrama para obtenção de material com características adequadas (adaptado de DOT, 2009)

O valor da rugosidade é outro parâmetro que necessita de ser controlado, para que se garanta um bom desempenho da infraestrutura de transporte. O nível de serviço depende da irregularidade, como se indica no quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Estimativa do Nível de Serviço em função do IRI (adaptado de DOT, 2009)

Nível de Serviço	Severidade	Irregularidade Máxima (IRI) (m/km)	Poeira (Jones e Paige-Green, 2000)	Não transitável
5	Severa	15	5	Frequentemente
4	Entre alerta e severa	11	3	<5 dias/ano
3	Alerta	9	3	Nunca
2	Entre ligeira e alerta	8	3	Nunca
1	Ligeira	6	1	Nunca

Severa - Danos extremos Defeitos secundários muito desenvolvidos. Necessidade de manutenção de manutenção urgente.

Alerta - Danos visíveis. Início de defeitos secundários. (Possíveis consequências. Pode ser necessário manutenção a curto prazo, por exemplo tapar covas)

Ligeira - Apenas são visíveis os primeiros sinais de danos.

As irregularidades na via podem ser atenuadas através de uma adequada compactação do material no estado húmido, levando a que o agravamento das irregularidades ocorra mais lentamente, assim como a perda de cascalho e a formação de poeira.

Na África do Sul, a disponibilidade de equipamentos de medição de irregularidades é escassa o que impossibilita a medição do IRI (DOT, 2009). Contudo, pode-se fazer uma estimativa do IRI em função da velocidade de conforto (quadro 2.8).

Existem fórmulas que permitem calcular o agravamento das irregularidades com o tempo (equação 3.5) e o valor das irregularidades depois do alisamento (equação 3.6). Estas fórmulas dependem de fatores como o volume de tráfego, as propriedades dos materiais e o clima (DOT, 2009). De salientar que, em ambas as equações, a classificação é normalizada para 100% de material passado no peneiro 37,5 mm.

$$\text{LnR} = D[-13,8 + 0,00022 \cdot \text{PF} + 0,064 \cdot \text{S1} + 0,137 \cdot \text{P26} + 0,0003 \cdot \text{N} \cdot \text{ADT} + \text{GM} \cdot (6,42 - 0,063 \cdot \text{P26})] \quad (3.5)$$

em que:

LnR - logaritmo natural da variação da irregularidade com o tempo

D - número de dias desde o último alisamento

PF - produto do limite de plasticidade (PL) pela percentagem de passados no peneiro 0,075 mm (P075)

S1 – variável relacionada com a estação do ano (0 - estação húmida; 1 - estação seca)

P26 - percentagem de passados no peneiro 26,5 mm (87-100%)

N - coeficiente de Weinert (1-10)

ADT - tráfego médio diário

GM - módulo granulométrico (0,3-2,5)

$$\text{LRA} = 1,07 + 0,699 \cdot \text{LRB} + 0,0004 \cdot \text{ADT} - 0,13 \cdot \text{DR} + 0,0019 \cdot \text{LABMAX} \quad (3.6)$$

em que:

LRA - logaritmo natural da irregularidade após alisamento

LRB - logaritmo natural da irregularidade antes do alisamento

ADT - tráfego médio diário (10-350 VPD)

DR – coeficiente relacionado com a formação de poeira (P075/P425)*(0,24-0,92)

LABMAX – dimensão máxima das partículas determinada em laboratório (6,7-58 mm)

Apesar das irregularidades poderem ser atenuadas, nada impossibilita a sua formação a médio prazo e, por isso, há necessidade de recorrer a técnicas de manutenção com o objetivo de controlar a qualidade da estrada. A frequência de manutenção depende do nível de serviço em que a estrada se encontra devido à sua exposição a fatores como a precipitação e o tráfego. As condições da estrada são avaliadas através de Sistemas de Gestão de Manutenção que classificam os elementos da estrada, tendo em conta a sua principal utilidade (DOT, 2009).

Existem vários tipos de manutenção, como por exemplo, a de rotina, a periódica e a de emergência. A Manutenção de Rotina é adotada anualmente com o objetivo de conservar as condições da estrada e manter o nível de serviço. A Manutenção Periódica é realizada após um período de alguns anos com o intuito de conservar a integridade estrutural da superfície da estrada. A Manutenção de Emergência é adotada quando ocorre um acontecimento que não foi previsto e provoca interrupção do tráfego. Estas medidas de manutenção só são adotadas após a avaliação das condições da estrada de modo a garantir uma adequada relação custo/benefício, relação essa que, ocasionalmente, poderá ser difícil de garantir (DOT, 2009).

Na África do Sul, o método de avaliação da estrada aplicado é o *Assessment Gravel Roads*, que foi proposto por Visser (1997) e Visser et al. (1987) (Ferreira, 2004), e é baseado na inspeção visual. Na avaliação da estrada é necessário registrar os defeitos ao nível estrutural e funcional da superfície da estrada, atribuindo-lhes uma classificação numa escala de 1 a 5, tendo em conta a severidade e a densidade do defeito, e anotando a sua localização e a última intervenção de manutenção (Ferreira, 2004).

3.3.2. QUÊNIA

O desenvolvimento económico do Quênia, tal como acontece na maioria dos países em desenvolvimento, é promovido pelo setor agrícola e para tal, há necessidade de garantir que os acessos estão em boas condições de funcionamento. As estradas não pavimentadas são os acessos mais utilizados no Quênia visto que correspondem a mais de 90% da rede rodoviária. Nestas circunstâncias, têm sido realizados estudos com o objetivo de avaliar a degradação da superfície das estradas. Um desses estudos, desenvolvido em cooperação entre o Ministério de Transportes e Comunicações do Quênia, o Banco Mundial e o TRRL (*Transport and Road Research Laboratory*) focou, essencialmente, as estradas de cascalho, com o intuito de investigar técnicas de manutenção para atenuar os defeitos existentes na via (Jones, 1984).

Para o estudo utilizaram-se trechos de estradas onde foram realizados ensaios com o objetivo de avaliar a deterioração da superfície para que, posteriormente se pudesse estimar a frequência e o tipo de manutenção, tendo em atenção as ações do tráfego e dos agentes climatéricos, a geometria da estrada e as propriedades do cascalho. Os defeitos que são abordados no estudo são a perda de cascalho, as irregularidades, as covas e o material solto existente na superfície da estrada.

A perda de cascalho na superfície da estrada, que está relacionada com as propriedades do material, com a inclinação do terreno e com a precipitação, é calculada também pela equação 2.6. Neste modelo, a variação do fator relativo ao tipo de material é pouco significativa, sendo propostos os seguintes valores:

laterite=1,29;

quartzitos=1,51;

vulcânicas=0,96;

coral=1,5;

arenito=1,38.

Relativamente às irregularidades ocorridas na superfície, o principal fator para a formação de tais defeitos é a ação do tráfego. Em função do tipo de material são propostas as seguintes relações:

$$\text{Laterítico} \quad R=3008+22,300 \cdot T-0,531 \cdot T^2-0,0033 \cdot T^3 \quad (3.7)$$

$$\text{Quartzítico} \quad R=3384+52,287 \cdot T+0,143 \cdot T^2+0,0157 \cdot T^3 \quad (3.8)$$

$$\text{Vulcânico} \quad R=3442+2,519 \cdot T+8,111 \cdot T^2-0,0934 \cdot T^3 \quad (3.9)$$

$$\text{Arenítico} \quad R=3505+221 \cdot T-6,360 \cdot T^2+0,0736 \cdot T^3 \quad (3.10)$$

em que:

R - Rugosidade medida em mm/km

T - Tráfego acumulado em ambos os sentidos, medido em milhares de veículos

É de notar que os cascalhos lateríticos se degradam mais lentamente, ao contrário do que acontece com os cascalhos vulcânicos, atingindo estes valores de rugosidade mais elevados, para o mesmo tráfego.

Analogamente às irregularidades, a profundidade da cova poderá ser calculada, tendo em conta o tipo de cascalho e o tráfego acumulado, da seguinte forma:

$$\text{Laterítico} \quad RD=7,18-0,081 \cdot T+0,0069 \cdot T^2-0,000036 \cdot T^3 \quad (3.11)$$

$$\text{Quartzítico} \quad RD=7,49+0,171 \cdot T+0,014 \cdot T^2-0,00009 \cdot T^3 \quad (3.12)$$

$$\text{Vulcânico} \quad RD=10,11+0,314 \cdot T+0,00031 \cdot T^2+0,00002 \cdot T^3 \quad (3.13)$$

$$\text{Arenítico} \quad RD=7,09+0,573 \cdot T-0,0128 \cdot T^2+0,00024 \cdot T^3 \quad (3.14)$$

em que:

RD - Profundidade da cova medida em mm

T - Tráfego acumulado em ambos os sentidos, medido em milhares de veículos

Tal como nas irregularidades, os cascalhos lateríticos são os que têm um desenvolvimento de covas menos pronunciado, enquanto nos cascalhos vulcânicos acontece o inverso.

Tanto na formação de irregularidades como de covas, o aumento da velocidade irá agravar a formação de defeitos, apesar de não estar explícito nas equações.

3.4. AMÉRICA

3.4.1. ESTADOS UNIDOS

Os Estados Unidos têm sido dos países onde se têm desenvolvido mais métodos de dimensionamento e de avaliação dos danos no que diz respeito a estradas não pavimentadas. Esses métodos foram desenvolvidos por organizações como a USACE (*United States Army Corps of Engineers*), FHWA (*Federal Highway Administration*), USFS (*United States Forest Service*) e AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*). A versatilidade dos métodos permite que, além de poderem ser aplicados no próprio país, seja possível aplicá-los noutros locais.

Nos Estados Unidos as estradas não pavimentadas correspondem a cerca de 35% da rede rodoviária, sendo a sua maioria estradas de cascalho. Um dos métodos para determinar a espessura da camada de cascalho, em função do tráfego de projeto, foi desenvolvido pela AASHTO (1993), e recorre aos

ábacos apresentados na figura 3.3. Neste método pode considerar-se, eventualmente, diversos valores do módulo de deformabilidade do material do leito, em função do seu teor em água, que varia ao longo do ano, e contemplar o volume de tráfego associado. Para calcular a espessura média da camada é necessário considerar um índice de aptidão de serviço da estrada (para estradas de baixo volume pode adotar-se o valor 2) bem como uma profundidade para a rodeira. A espessura de projeto será a espessura média da camada, adicionada de um valor relativo à perda de agregado (FHWA, 2000).

$$DBS = \overline{DBS} + 0,5 \cdot GL \quad (3.15)$$

em que:

DBS - Espessura de projeto da camada (polegadas)

\overline{DBS} - Espessura média da camada (polegadas)

GL - Perda total do agregado (polegadas)

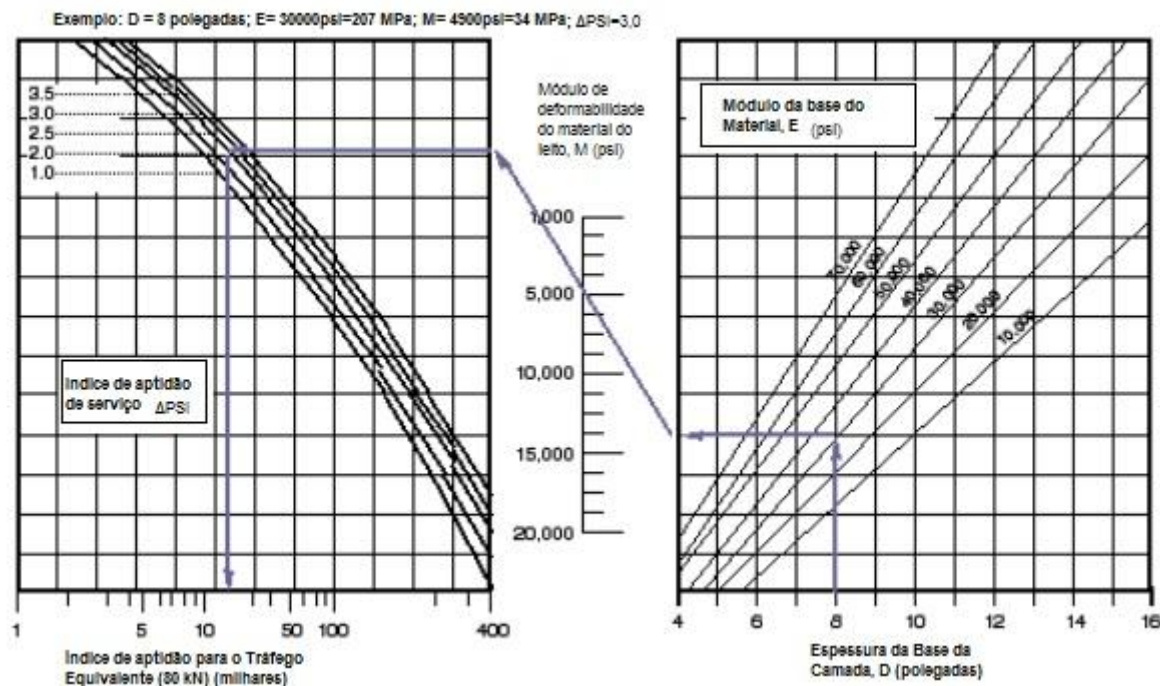


Fig. 3.3 - Exemplo de ábaco utilizado na determinação da espessura de cascalho segundo a AASHTO (USDT, 2000)

Outro método usado para determinar a espessura da camada de cascalho foi desenvolvido por Barber et al. (1978) e por Greenfield (1993) (Fairbrother, 2011)., com a cooperação da USACE, com o intuito de satisfazer as necessidades das estradas florestais. Este é um método que contempla vários fatores que são considerados importantes no dimensionamento de estradas florestais. No entanto, essa diversidade de variáveis torna o cálculo complexo.

$$\log(t) = 1,53 + 0,27 \cdot \frac{P_k^{0,2016} \cdot t_p^{0,2481} \cdot R^{0,0474}}{RD^{0,2128} \cdot C_1^{0,2414} \cdot C_2^{0,0596}} \quad (3.16)$$

em que:

t - Espessura do pavimento (mm)

P_k - Eixo equivalente

t_p - Pressão dos pneus
 R - Nº de aplicações de carga
 RD - Profundidade de rodeiras na rotura
 C_2 - CBR da fundação
 C_1 - CBR dos agregados

Além do método acima referido, a USACE também participou no financiamento de estudos que deram origem a outro método, desenvolvido por Hammitt (1970) e posteriormente Barber, Odom e Patrick (1978), onde o objetivo era também a determinação da espessura da camada de cascalho, de acordo com a equação 3.17 (Fortunato et. al, 2013).

$$\log HG = 1,40 + 12,30 \cdot C_1^{-0,466} \cdot C_2^{-0,142} \cdot NE^{0,124} \cdot RDC^{-0,50} \quad (3.17)$$

em que:

HG - Espessura de cascalho (mm)

C_1 - CBR (%) embebido do material de superfície

C_2 - CBR (%) embebido do solo

NE - Nº de eixos equivalentes (P=40kN) com rodado simples e pressão de pneus Q=55 kPa

RDC - Profundidade máxima de rodeiras (mm)

Neste modelo, quando a carga da roda (P) e a pressão dos pneus (Q) são muito diferentes, substitui-se o coeficiente 12,3 por $0,856 \cdot P^{0,235} \cdot Q^{0,285}$.

Relativamente à avaliação das condições superficiais de pavimentos terrosos, nos Estados Unidos existem vários métodos. No método *Unsurfaced Road Condition Index* (URCI), proposto pela USACE, medem-se defeitos da superfície, tais como, seção transversal inadequada, drenagem inadequada, rodeiras, cremalheiras, poeira, covas e perda de agregados. Os defeitos são considerados individualmente e em função da área que ocupam. O processo de avaliação é composto por uma inspeção da estrada dentro dum veículo que circula a uma velocidade de 40 km/h, onde o inspetor anotarà quaisquer defeitos existentes na superfície, atribuindo-lhe classificações. Este processo é repetido uma vez em cada estação do ano. As condições da estrada podem ser avaliadas numa escala de 0 a 100, de acordo com o quadro 3.4 (Ferreira, 2004).

Quadro 3.4 - Escala e classificação da condição da estrada segundo URCI (adaptado de Ferreira, 2004)

Escala	Classificação
100-85	Excelente
85-70	Muito Bom
70-55	Bom
55-40	Regular
40-25	Mau
25-10	Muito Mau
10-0	Péssimo

O método *Road Surface Management System* (RSMS) foi desenvolvido pela Universidade de New Hampshire-EUA e trata-se de um sistema informático que estabelece a gestão do pavimento de estradas pavimentadas e não-pavimentadas, em relação às alternativas de manutenção. Os defeitos são avaliados de acordo com o manual de campo *Identification of Road Surface Conditions*, onde se classifica os defeitos de acordo com a severidade e a densidade da área que ocupam (quadro 3.5), atribuindo-lhes uma alternativa de manutenção (Ferreira, 2004).

Quadro 3.5 - Avaliação da superfície da estrada não pavimentada segundo RSMS (adaptado de Ferreira, 2004)

Defeitos	Parâmetros		
	Nível	Severidade	Densidade
Cremalheiras	Baixo	Profundidade <2,5cm	<10% da superfície da estrada
	Médio	Profundidade 2,5-5,5cm	Entre 10-30%
	Alto	Profundidade >7,5cm	>30 % da superfície da estrada
Covas	Baixo	Profundidade <2,5cm e/ou Diâmetro <30cm	Área<10% e/ou 5covas/60m
	Médio	Profundidade 2,5-7,5cm e/ou Diâmetro 30-60cm	Área 10-30% e/ou 10covas/60 m
	Alto	Profundidade >7,5cm e/ou Diâmetro >60cm	Área>30% e/ou >10covas/60m
Rodeiras	Baixo	Profundidade <2,5cm	Área<10%
	Médio	Profundidade 2,5-7,5cm	Área 10-30%
	Alto	Profundidade >7,5cm	Área>30%
Perda de Agregados	Baixo	Berma <5,0cm	Área<10%
	Médio	Berma 5,0-10,0cm	Área 10-30%
	Alto	Berma >10,0cm	Área>30%
Poeira	Bom	Nuvem pouco densa, não obstrui a visibilidade	
	Regular	Nuvem densa que obstrui parcialmente a visibilidade	
	Mau	Nuvem muito densa que obstrui severamente a visibilidade	
Seção Transversal Inadequada	Bom	Pouca ou sem poças d'águas, abaulamento bom	
	Regular	Algumas poças d'águas, pouco ou sem abaulamento	
	Mau	Extensas poças d'águas, depressões	
Drenagem Inadequada	Bom	Desobstruídas, valetas e canais limpos	
	Regular	Algumas poças d'águas ou erosão na lateral da estrada	
	Mau	Escoamento da água na estrada, poças d'águas na lateral da estrada	

O *Gravel Paser (Pavement Surface Evaluation and Rating) Manual* – GPM, foi elaborado pela Universidade de Wisconsin-Madison-EUA. Este método permite avaliar visualmente as condições da estrada de cascalho devidas às ações do tráfego e das chuvas. O GPM considera importante avaliar as condições da seção transversal, da drenagem, da camada de cascalho e das deformações e defeitos existentes na superfície, classificando o defeito e atribuindo-lhe um valor numa escala que varia entre 1 e 5, de acordo com o quadro 3.6 (Ferreira, 2004).

Quadro 3.6 - Classificação dos defeitos da estrada segundo o método GPM (adaptado de Ferreira, 2004)

Defeitos/Classificação	Excelente 5	Bom 4	Regular 3	Mau 2	Péssimo 1
Seção transversal	Excelente	Boa	Boa	Pouca	Sem
Cremalheiras (profundidade)	Nenhuma	Leve	2,5 - 5,0cm	>7,5cm; 25% da área	Não especificado
Rodeiras (profundidade)	Nenhuma	Nenhuma	Leve (<2,5cm)	Moderada (2,5-7,5cm; 10-25% de área)	Severa (>7,5cm; >25% de área)
Covas (profundidade)	Nenhuma	Nenhuma	Alguma (<5,0cm)	Moderada (5,0-10cm; 10- 25% de área)	Severa (>10cm; >25% de área)
Perda de Agregados	Nenhuma	Nenhuma	Cerca de 5,0cm	Severa (>10cm)	Muitas áreas (>25%)

3.4.2. BRASIL

O Brasil é um país composto maioritariamente por estradas não pavimentadas visto que este tipo de infraestrutura representa mais de 90% da rede rodoviária. O Brasil carece de métodos de manutenção adequados às condições do país, pelo que os seus técnicos recorrem a métodos com origem noutros países que, de alguma forma, se adaptam às condições do Brasil (Ferreira, 2004).

Os métodos de classificação das condições da superfície da estrada existentes em outros países que melhor se adaptam às características do Brasil são o RCS/DVI, o RSMS e Eaton et al. (1987), sendo que o primeiro foi desenvolvido no Reino Unido e os seguintes nos Estados Unidos da América. Esta conclusão foi obtida por Ferreira (2004) após a realização de estudos *in situ* com a aplicação dos métodos.

Apesar do Brasil não ter elaborado nenhum método para caracterizar os defeitos, existem manuais como o Manual Técnico para Conservação e Recuperação de Estradas Vicinais de Terra, do IPT (Santos et al, 1985) e uma publicação do DNER, Conservação de Estradas Não-pavimentadas (1981) que auxiliam os órgãos responsáveis pela manutenção das estradas (Ferreira, 2004).

3.5. OCEÂNIA

3.5.1. NOVA ZELÂNDIA E AUSTRÁLIA

A Austrália e a Nova Zelândia são países onde predominam as zonas desertas e florestais, e onde as estradas não pavimentadas são acessos bastante utilizados, constituindo cerca de 60% da rede rodoviária.

Para que as estradas não pavimentadas sejam bem dimensionadas, a Austrália desenvolveu um guia para a concepção de estradas. O guia, denominado por *Austroads Pavement Design Guide* (APDG) foi, inicialmente, concebido em 1992 e, posteriormente, em 2004 com o auxílio da Nova Zelândia, que forneceu informação sobre aspetos a melhorar no guia. Este guia foi dos primeiros a abordar o tema da concepção de estradas e, portanto, constitui uma importante referência para os desenvolvimentos posteriores. Em 2009, foi elaborado um guia para estradas não pavimentadas (*Guide to Pavement Technology – Part 6: Unsealed Pavements*), baseado no guia APDG, onde se apresenta metodologias para, por exemplo, determinação da espessura da camada de superfície. Para a determinação desta espessura é necessário conhecer o valor do tráfego de projeto e o valor do CBR da camada de fundação. A espessura obtida no ábaco da figura 3.4 corresponde ao valor mínimo necessário para que não haja deformação na fundação durante a vida útil do pavimento. O guia permite ainda estimar a perda de agregados, os quais devem ser repostos aquando das manutenções de rotina (Brito, 2011).

É de notar que a espessura mínima indicada no ábaco é 100 mm e que para uma camada de fundação com CBR inferior a 3 é necessário proceder à estabilização até uma profundidade entre 100 e 150 mm.

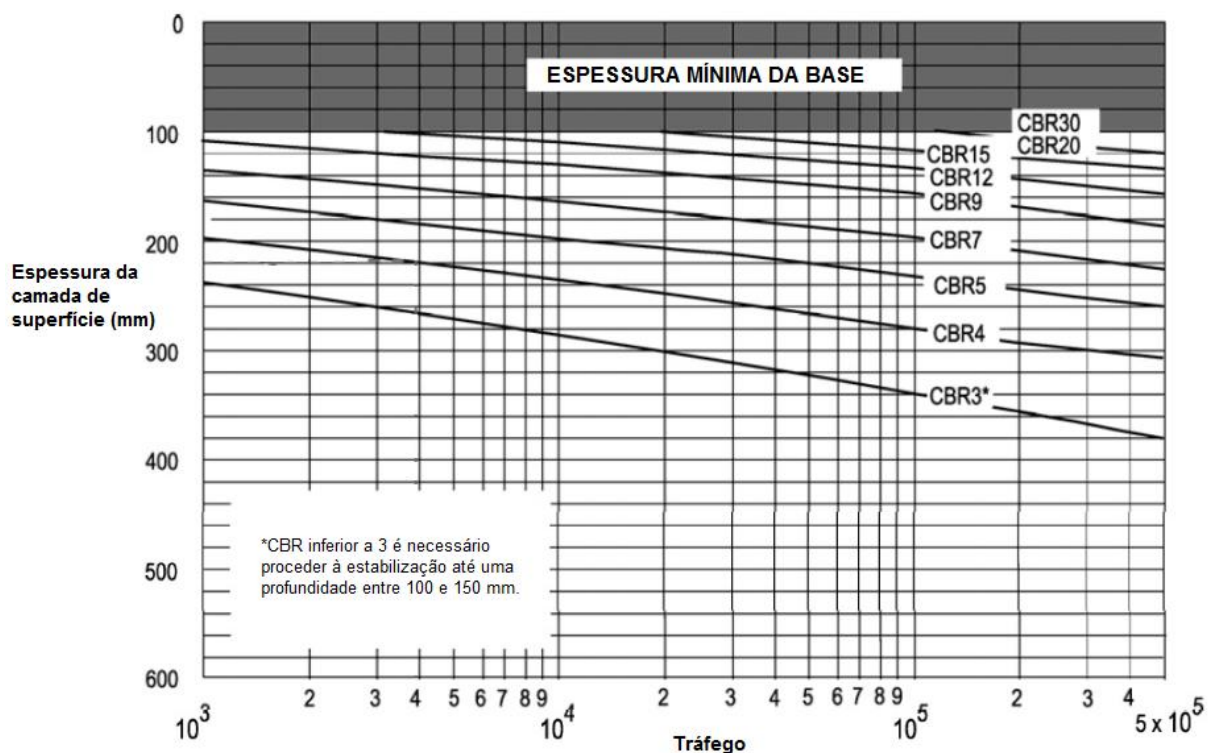


Fig. 3.4 - Ábaco para a determinação da espessura da camada de cascalho (adaptado de ARRB, 1998)

3.6. OUTROS MÉTODOS

3.6.1. BANCO MUNDIAL E ASSOCIAÇÃO MUNDIAL DE ESTRADAS

Um dos projetos financiados pelo Departamento de Transportes do Banco Mundial foi o *Highway Design and Maintenance Standards Model* (HDM III), o qual foi desenvolvido em 1995 com o objetivo de satisfazer as necessidades das autoridades rodoviárias no que diz respeito à avaliação de políticas, normas e programas de construção e manutenção de estradas. Este modelo permite avaliar, entre outras questões, se uma proposta de construção ou projeto de manutenção é economicamente viável; se um projeto alternativo ao existente trará benefícios sociais; se há benefício em aplicar técnicas de manutenção em estradas existentes ou se deverão ser criadas novas. O HDM III foi delineado para fazer estimativas, com recurso a *software* adequado, dos custos relacionados com a construção e manutenção de estradas e operação dos veículos, com o intuito de obter a solução mais económica (World Bank, 2001).

Com base no HDM III, Greenstein and Livneh (1981) desenvolveram um método de dimensionamento para estradas não pavimentadas, tendo em consideração uma profundidade máxima das rodéiras na fundação de 75 mm. O método propõe a relação estabelecida na equação 3.18.

$$C_2 = 0,0138 \cdot N^{0,175} \cdot P^{0,580} \cdot Q^{0,490} \quad (3.18)$$

em que:

C_2 - CBR embebido do solo (%)

N - Número de passagens até à rotura

P - Eixo padrão (kN)

Q - Pressão dos pneus (kPa)

Em 2000, com base no HDM III e com a colaboração de *British Oversea Development Administration*, *Asian Development*, *Swedish National Road Administration* e *Interamerican Federation of Cement Manufacturers*, o Banco Mundial desenvolveu um novo projeto, que designou por *Highway Development and Management Model* (HDM 4) que dispõe de *software* e documentação para proceder à análise, planeamento, gestão e avaliação da manutenção de estradas. O HDM 4 além de analisar a gestão das estradas ainda apresenta soluções alternativas de investimento, tentando sempre que possível apresentar a relação custo-benefício de cada solução. Este projeto tem também a colaboração da PIARC (Associação Mundial de Estradas) que gere a informação do projeto na sua página de internet (World Bank, 2001).

Uma análise que pode ser realizada no HDM 4 é, por exemplo, o cálculo da perda de cascalho. Conforme apresentado no capítulo anterior, nas equações 2.7 e 2.8, a perda de cascalho pode ser calculada tendo em conta um conjunto de fatores como o tráfego, o clima, a geometria da estrada e as características do material. Devido à capacidade deste projeto para apresentar soluções alternativas, pode-se avaliar os resultados obtidos em cada análise e ajustar alguns fatores, como por exemplo, adequar a escolha do material em relação ao tráfego e clima e, assim, obter resultados de perda de cascalho relativamente baixos, possibilitando poupanças nos custos de utilização e de manutenção das estradas.

Também pode ser analisada a rugosidade presente na superfície da estrada através do *software* que este modelo possui, onde constam equações para avaliar a rugosidade (IRI). As equações são válidas para estradas com drenagem adequada e manutenção regular.

A figura 3.5 evidencia a influência na irregularidade (IRI) da estrada de fatores como a frequência de regularização, o tráfego, o clima e a topografia.

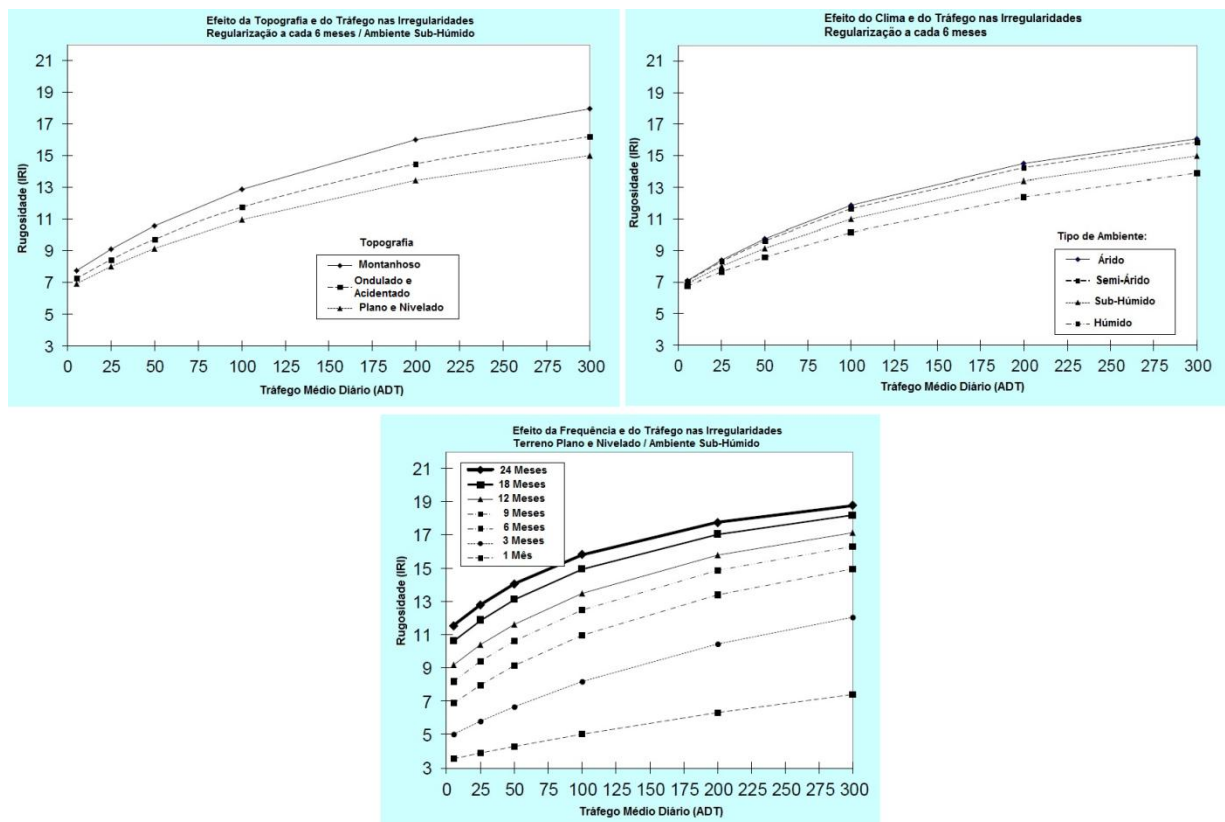


Fig. 3.5 - Influência de diferentes fatores nas irregularidades na estrada: a) Efeito da Topografia e do Tráfego; b) Efeito do Clima e do Tráfego; c) Efeito da Frequência e do Tráfego (HDM 4, 2000)

3.7. COMPARAÇÃO DE MÉTODOS

Tendo em conta alguns dos modelos abordados ao longo deste capítulo, os quadros 3.7 e 3.8 apresentam uma síntese dos fatores que, segundo cada um dos modelos, mais influenciam a perda cascalho e a rugosidade, respetivamente.

Como se pode verificar no quadro 3.7, os principais fatores que influenciam a perda de cascalho são as propriedades do material, o volume de tráfego, as condições climáticas e a geometria da estrada. Nos modelos HDM 4 e ARRB são considerados todos os fatores principais, enquanto no TRH 20 não é considerada a geometria do traçado.

No que diz respeito às propriedades do material, tanto no HDM 4 como no TRH 20 são consideradas as propriedades intrínsecas, como a plasticidade e a granulometria, o que não acontece no ARRB que apenas se concentra no tipo de material (litologia).

Tanto a ação do tráfego como as condições climáticas são consideradas nos três modelos.

Relativamente à geometria do traçado, o HDM 4 considera a inclinação longitudinal, em m/km, e a curvatura horizontal média, em graus/km, enquanto o ARRB considera apenas o gradiente, em percentagem.

Quadro 3.7 - Quadro comparativo dos fatores que influenciam a perda de cascalho (van Zyl, Henderson e Uys, 2007)

		HDM 4	TRH 20	ARRB
Material	Tipo de material (f)			•
	Índice de Plasticidade (PI)	•		
	Passado 0,075 mm (P075)	•	•	
	Passado 26,0 mm (P26)		•	
	Limite de Plasticidade (PL)		•	
Tráfego médio diário anual (AADT)		•	•	•
Clima	Precipitação média mensal (MMP)	•		
	Coeficiente de Weinert (N)		•	
	Pluviosidade anual (m) (RI)			•
Geometria	Inclinação longitudinal (m/km) (RF)	•		
	Gradiente (%) para um trecho (Vc)			•
	Curvatura horizontal média (graus/km) (C)	•		
Fatores de Calibração		•		
	Perda de material (Kgl) e ação do tráfego no arranque do material (Kkt)	•		

Da análise do quadro 3.8, conclui-se que os principais fatores que influenciam a rugosidade são os já comentados relativamente à perda de cascalho; para além desses, são ainda considerados a qualidade de compactação e a frequência de regularização. O modelo ARRB não apresenta parâmetros para a previsão da rugosidade.

Os parâmetros relativos às propriedades do material, embora sensivelmente diferentes, focam as mesmas propriedades nos dois modelos. Em ambos os modelos são abordadas a ação do tráfego, as condições climáticas e a frequência de regularização. Apenas no HDM 4 são abordados os parâmetros relacionados com o tipo de tráfego (média diária de veículos ligeiros e pesados).

Quadro 3.8 - Quadro comparativo dos fatores que influenciam a rugosidade (van Zyl, Henderson e Uys, 2007)

		HDM 4	TRH 20	ARRB
Material	Índice de Plasticidade (PI)	•		
	Passado 0,075 mm (P075)		•	
	Passado 26,0 mm (P26)		•	
Inclinação média da curva granulométrica (passados nos peneiros #2,0; #0,425 e #0,075mm) (MGj)		•		
Módulo Granulométrico (peneiros #2,0; #0,425 e #0,075mm) (GM)			•	
Coefficiente de poeira (peneiros #2,0; #0,425 e #0,075mm) (DR)		•	•	
Limite de Plasticidade (PL)			•	
Dimensão Máxima (LABMAX)			•	
Tamanho Máximo da partícula com 95% de material passado (P95)		•		
Tráfego médio diário anual (AADT)		•	•	
Média diária de veículos ligeiros		•		
Média diária de veículos pesados		•		
Clima	Precipitação média mensal (MMP)	•		
	Coefficiente de Weinert (N)		•	
	Variável relacionada com a estação do ano (S1)		•	
Geometria	Inclinação longitudinal (m/km) (RF)	•		
	Curvatura horizontal média (graus/km) (C)	•		
Qualidade da Compactação		•		
Frequência de regularização (BF)		•	•	
Rugosidade antes da regularização (RBBL)		•		
Rugosidade depois de regularização (RABL)		•		

4 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO E DE AVALIAÇÃO DOS DANOS

4.1. ENQUADRAMENTO

Neste capítulo faz-se uma aplicação a Portugal dos métodos de dimensionamento e de avaliação dos danos de estradas não pavimentadas utilizados noutros países. Em Portugal, apesar da existência de estradas não pavimentadas não ser tão vasta como nos países anteriormente referidos, este tipo de estradas são utilizadas em algumas zonas florestais e agrícolas e também em algumas zonas rurais. No entanto, não existe um método de dimensionamento que reflita a experiência portuguesa na construção dessas estradas. Relativamente à manutenção também não existem métodos específicos para avaliar e inspecionar os problemas existentes na via, nem medidas preventivas para limitar a sua degradação.

4.2. APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

Considerando a informação apresentada no capítulo anterior, procedeu-se a uma análise para estimar os valores que se podem obter em Portugal com alguns dos métodos de dimensionamento e de avaliação dos danos, anteriormente apresentados. Para proceder à análise, primeiro avaliou-se alguns fatores que são considerados preponderantes no dimensionamento de estradas não pavimentadas.

Um dos fatores fulcrais no dimensionamento e avaliação dos danos é o tráfego que é considerado, tendo em atenção que se trata de estradas de baixo volume de tráfego, e sabendo que os valores de referência dependem de país para país. Após a análise do quadro 2.1 e os critérios adotados no TRH 20 e no TRL, estabeleceu-se um intervalo de tráfego a considerar. O quadro 2.1 resulta dum estudo realizado em vários países onde se determinou o volume de tráfego máximo para determinadas características da estrada. Os critérios adotados no TRH 20 consideram que, para estradas não pavimentadas, os métodos são aplicáveis para tráfegos de 200 VPD, onde menos de 30% desses veículos são pesados (eixos equivalentes de 80kN). De acordo com o TRL, e ilustrado no quadro 2.6, considera-se que um tráfego médio corresponde à passagem de 100 veículos motorizados, onde 20% desses veículos são pesados (eixos equivalentes de 100kN).

Atendendo aos elementos referidos, o intervalo analisado para aplicação dos métodos de dimensionamento da espessura da camada de desgaste foi de 15 a 90 veículos por dia (VPD), com eixos equivalentes de, num caso 80 kN, noutro 40 kN. Calculou-se tráfego para um ano, pelo que se admite que a camada de desgaste com a espessura dimensionada, e para cumprir o critério de rotura estabelecido, tenha que ser reposta todos os anos.

Para os métodos de determinação da severidade dos danos, como a perda de cascalho e a profundidade da cova, foi utilizado um intervalo entre 50 e 300 VPD.

As condições climáticas são outro fator a considerar, dando especial atenção à pluviosidade. A pluviosidade em Portugal, segundo mapas do Instituto Português do Mar e da Atmosfera, varia entre 600 mm/ano na zona Sul, 1200 mm/ano na zona Centro e 2400 mm/ano na zona Norte. Atendendo a estes valores, e de acordo com o que já foi referido durante o trabalho, a zona Norte de Portugal estará no limite, em termos de pluviosidade máxima, para que seja adequado construir estradas não pavimentadas, sob o ponto de vista de uma análise racional. Este fator será considerado explicitamente apenas no método do TRL para o cálculo da perda de cascalho.

A definição do tipo de material também é importante quer no dimensionamento de estradas, para atribuição da espessura adequada, quer na determinação dos danos, para avaliar as irregularidades na superfície da estrada. Neste caso, serão utilizados três tipos de cascalho na camada de desgaste, com propriedades diferentes, para avaliar a influência dos vários parâmetros em causa, nos resultados obtidos, tanto para o dimensionamento como para a avaliação dos danos. É de salientar que foram considerados para as camadas de fundação diferentes valores de CBR dentro do intervalo 5 a 15 que, de acordo com o quadro 2.6 proposto no TRL (2003), corresponde a fundação com características médias. A fundação tipo 1 tem valor de CBR de 7, a fundação tipo 2 de 10 e a fundação tipo 3 de 12.

Para os materiais da camada de superfície adotaram-se valores superiores de CBR, representativos das características mecânicas dos agregados a utilizar. Os valores adotados enquadram-se naqueles que são referidos para este tipo de materiais, por exemplo no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal. Consideraram-se então diversos tipos de cascalho para a camada de desgaste, com valores de CBR de 30 para o material 1, de 40 para o material 2 e de 50 para o material 3.

Após a atribuição de valores aos fatores preponderantes, estão reunidas as condições para proceder ao dimensionamento da estrada, determinando a espessura da camada de cascalho. A determinação da espessura da camada é realizada de acordo com o método proposto pelo TRL (2003) (equação 3.1) e com o proposto por Hammitt (1970) e posteriormente Barber, Odom e Patrick (1978) (equação 3.17).

Na determinação da espessura da camada de acordo com o método proposto pelo TRL (2003), os fatores considerados são os valores de CBR da camada de fundação e o número de eixos equivalentes (de 80 kN), conforme cálculos apresentados no Anexo I. O critério de dano é a formação de rodeiras na fundação com uma profundidade de 40 mm.

De acordo o método proposto por Hammitt (1970) e posteriormente Barber, Odom e Patrick (1978), os fatores utilizados são, além dos valores de CBR da camada de fundação e do número de eixos equivalentes, neste caso de 40 kN, os valores de CBR da camada de superfície e a profundidade máxima admissível para a formação de rodeiras, conforme apresentado no Anexo I. Nos cálculos foi considerado um valor de 40 mm para este parâmetro.

Os resultados obtidos da aplicação das fórmulas estão representados nas figuras seguintes (fig. 4.1 e 4.2) e representados nos quadros I.1 a I.4 (Anexo I).

As curvas obtidas evidenciam uma maior dependência da espessura da camada de desgaste relativamente ao volume de tráfego, para os níveis de tráfego mais baixos.

As características da fundação influenciam significativamente a espessura calculada para a camada de desgaste. Por exemplo, na figura 4.1, em termos médios, quando o CBR da fundação passa de 7 para 12, a espessura da camada diminui em cerca de 30%. No entanto, com a melhoria das características mecânicas da fundação, a variação da espessura da camada de desgaste passa a ser, comparativamente, menos relevante.

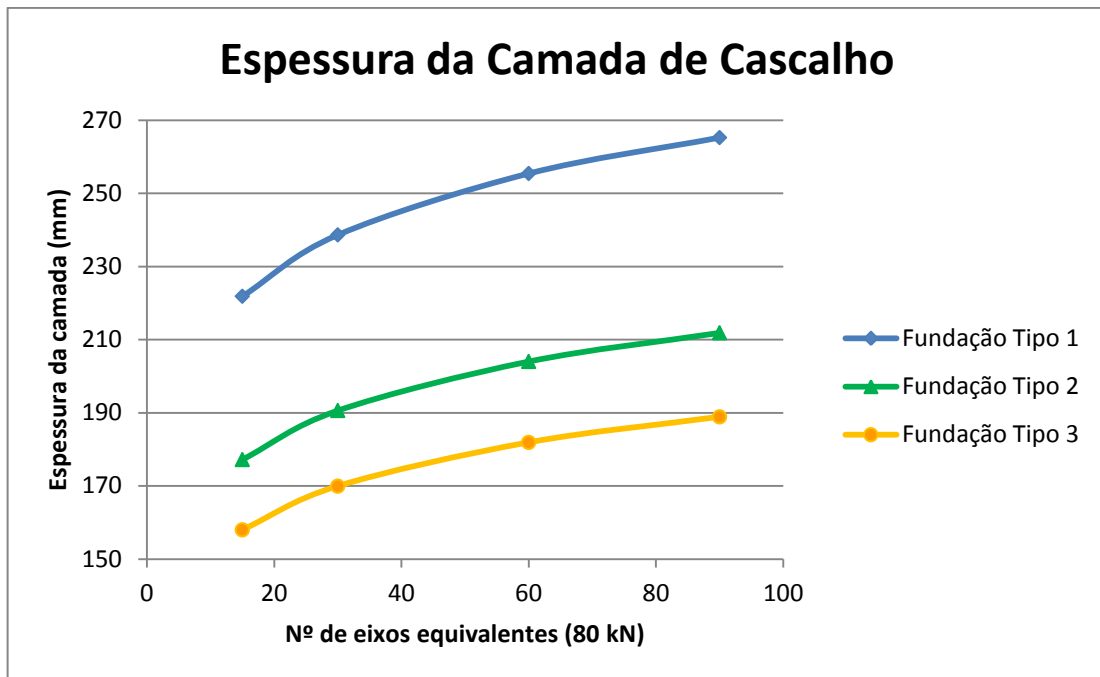


Fig. 4.1- Espessura da camada de cascalho em função do tráfego para os diferentes tipos de fundação, com base no TRL (2003)

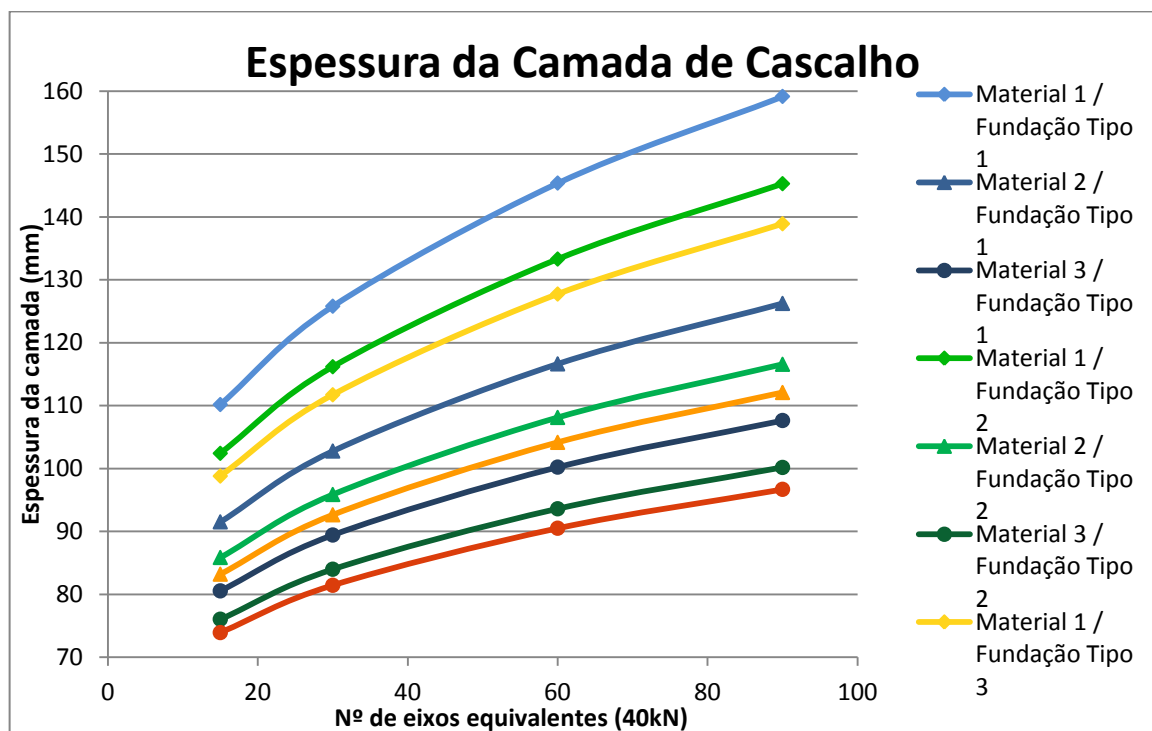


Fig. 4.2 - Espessura da camada de cascalho em função do tráfego para os diferentes tipos de fundação e tipos de material, com base no método de Hammitt (1970)

Relativamente aos resultados obtidos no método proposto por Hammitt (1970) (fig. 4.2) constata-se que a diferença relativamente ao TRL (2003) deve-se aos fatores que estão associados ao método, ou seja, o facto de ser considerado o valor do CBR do solo da camada de superfície. Feita uma análise

pormenorizada dos valores obtidos, é possível constatar que para ambos os métodos conduzirem a valores semelhantes, para volumes de tráfego semelhantes, o CBR do material da camada de desgaste tem de assumir valores entre 30 e 40.

4.3. APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE DANOS DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

4.3.1. PROFUNDIDADE DAS COVAS

Depois da entrada em operação da estrada, será necessário realizar manutenções de rotina e periódicas, após um período de alguns anos, com vista a limitar a severidade e a frequência dos defeitos. Relativamente à manutenção periódica, esta é realizada com o objetivo de evitar a degradação da superfície da estrada, atendendo ao desenvolvimento da rugosidade, à formação de covas, à perda de cascalho e à formação de poeira.

Um dos defeitos que pode ser avaliado, e cuja severidade (dimensão) é calculada, para posterior reparação, são as covas. Segundo o TRH 20 (DOT, 2009) a dimensão que as covas podem atingir sem que os veículos sejam muito afetados é entre 250 e 1500 mm de diâmetro e 50 e 75 mm de profundidade. Valores idênticos ou superiores a estes reduzem o desempenho da estrada e prejudicam a circulação dos veículos.

Segundo Jones (1984), é possível, em função do tipo de material e do volume de tráfego, determinar a profundidade das covas (equações 3.11 a 3.14). Contudo, as expressões propostas por este autor não contemplam explicitamente alguns dos materiais normalmente utilizados em Portugal, como os agregados calcários.

Atendendo à informação disponível, considerou-se a hipótese de se aplicar quartzitos ou arenitos na camada de desgaste. No Anexo I apresenta-se o quadro relativo aos cálculos efetuados (quadro I.5), com vista a determinar a profundidade das covas. Na fig. 4.4 apresentam-se os resultados obtidos.

É interessante notar que, segundo o método utilizado, ambos os materiais conduzem a valores semelhantes, para níveis de tráfego até 200 VPD (73000 veículos anuais). A equação relativa ao arenito conduz a resultados muito elevados para volumes de tráfego superiores, o que leva a concluir que, ou não foi calibrada para valores dessa ordem, ou este tipo de material não se comporta de forma adequada nessas circunstâncias. Estes resultados evidenciam a necessidade de os métodos utilizados estarem adaptados às condições de cada local.

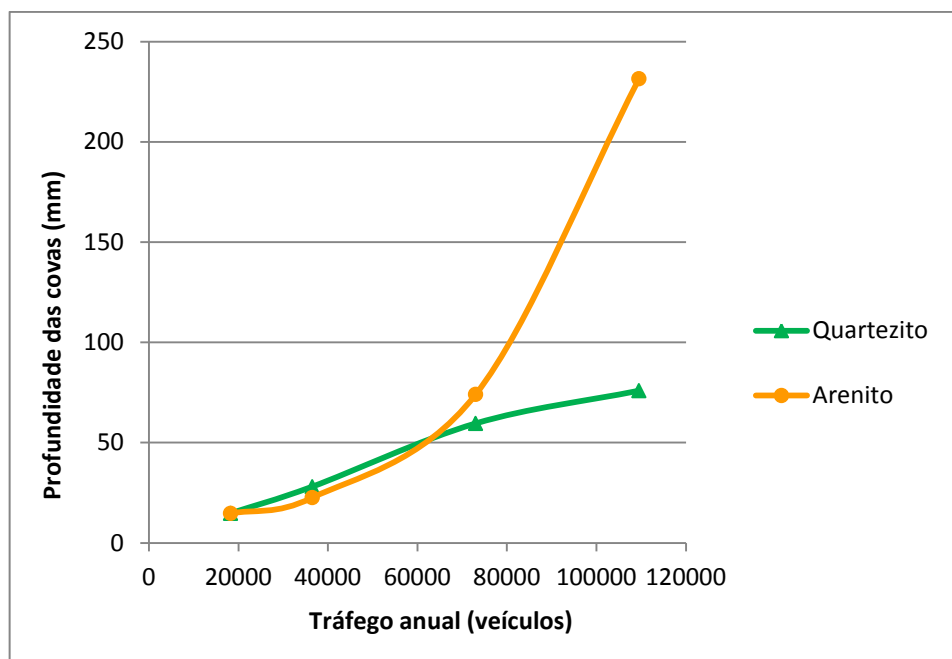


Fig. 4.3 - Profundidade da cova em função do tráfego e do tipo de material (método proposto por Jones (1984))

4.3.2. PERDA DE CASCALHO

Alguns documentos propõem valores de intervalos de tempo considerados adequados para a recarga total do material da camada de desgaste. No caso do TRH 20 (DOT, 2009) é referido o período de 7 anos.

Para a determinação da perda de cascalho recorreu-se à equação 2.5 proposta no TRH 20 (DOT, 2009) e à equação 2.6 proposta no TRL (2003), ambas referidas no capítulo 2.

A determinação da perda de cascalho segundo o TRH 20 (DOT, 2003) inclui fatores como o tráfego médio diário e as propriedades dos materiais que estão explícitos na fórmula, já as condições climáticas estão implícitas, ou seja, decorrem do valor atribuído ao coeficiente de Weinert.

Neste estudo fizeram-se cálculos relativos a três materiais, com granulometrias distintas e valores de plasticidade diferentes. As propriedades granulométricas dos materiais foram aferidas a partir de curvas que se podem considerar representativas de agregados deste tipo (Figura 4.4). Os valores do limite de plasticidade considerados foram de 10, 14 e 30, para os materiais 1, 2 e 3, respetivamente.

Nos cálculos agora apresentados consideram-se alguns valores como constantes, ou seja, o coeficiente de Weinert é sempre cinco e o período de análise foi considerado sete anos. Os valores adotados para as propriedades necessárias à aplicação da formulação, como aquelas que se relacionam com a granulometria e com a plasticidade apresentam-se no Anexo I (quadro I.6).

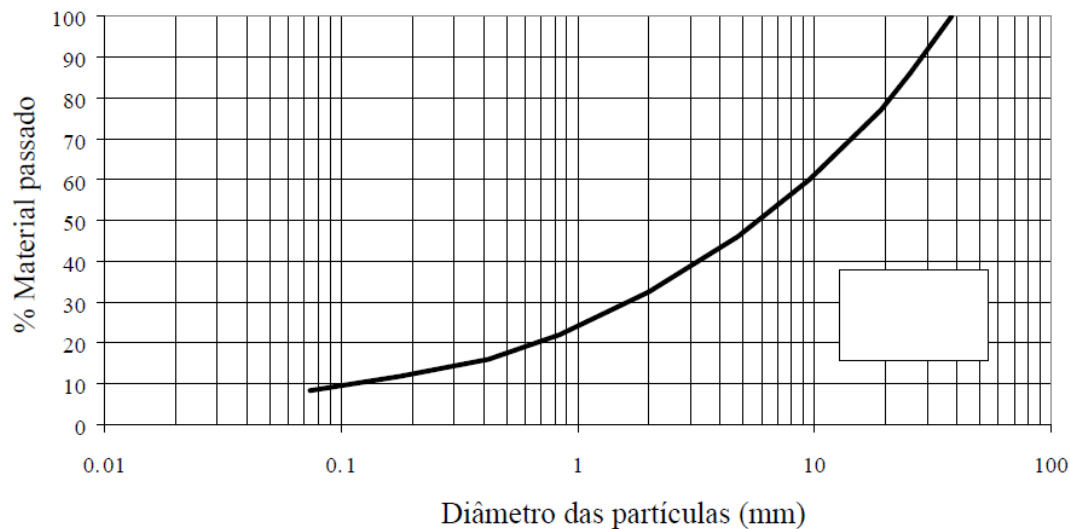


Fig. 4.4 - Exemplo de curva granulométrica utilizada (Fortunato, 2012)

A figura 4.5 mostra, para os três materiais, a relação entre a perda de cascalho e o tráfego. Para tráfego de 50 VPD os resultados são muito semelhantes para os três materiais. Com o aumento do tráfego, o material 1 tem um pior comportamento, em termos comparativos.

Estes resultados mostram que para volumes de tráfego significativos é necessário escolher de forma muito criteriosa os materiais para a camada de desgaste.

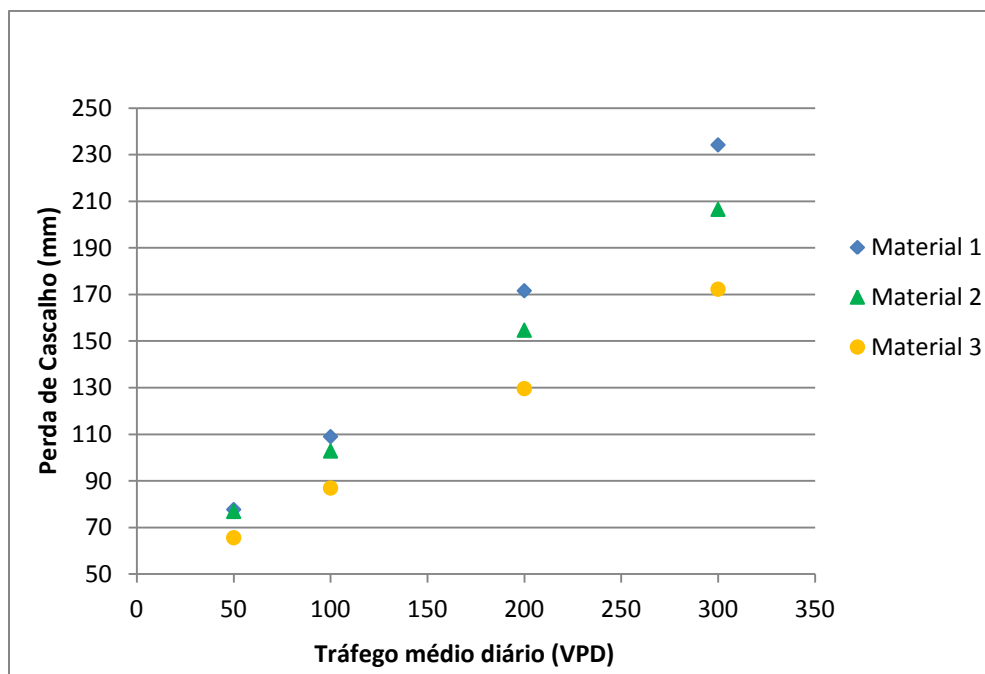


Fig. 4.5 – Relação entre o tráfego e a perda de cascalho ao fim de 7 anos com base no TRH20 (2009)

Relativamente à determinação da perda de cascalho com base no método do TRL (equação 2.6), os fatores incluídos na formulação são o tráfego, as propriedades do material, a inclinação transversal da estrada e a pluviosidade que estão representados no quadro I.7 a I.9 (Anexo 1). Para a inclinação da estrada atribuiu-se um valor de 3%.

Atendendo aos materiais que se utilizam em Portugal e à informação disponível, nomeadamente os valores do fator f , referidos no capítulo 2, determinou-se a perda de cascalho para calcarenito ($f=2,5$), quartzito ($f=1,5$) e arenito ($f=1,4$).

Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 4.6 onde, além de se relacionar os três materiais, ainda se relacionam três diferentes zonas, em termos de pluviosidade, pretendendo assim representar a zona Norte, a zona Centro e a zona Sul de Portugal Continental, com valores de pluviosidade 2400, 1200 e 600 mm/ano, com foi anteriormente referido. Da análise dos resultados verifica-se que a perda de cascalho é muito influenciada pelo volume de tráfego, mas também pelo tipo de material e pela pluviosidade. A taxa de perda com o aumento de tráfego é mais elevada para os materiais menos bons (calcarenito). Em termos comparativos essa perda agrava-se com o aumento da pluviosidade.

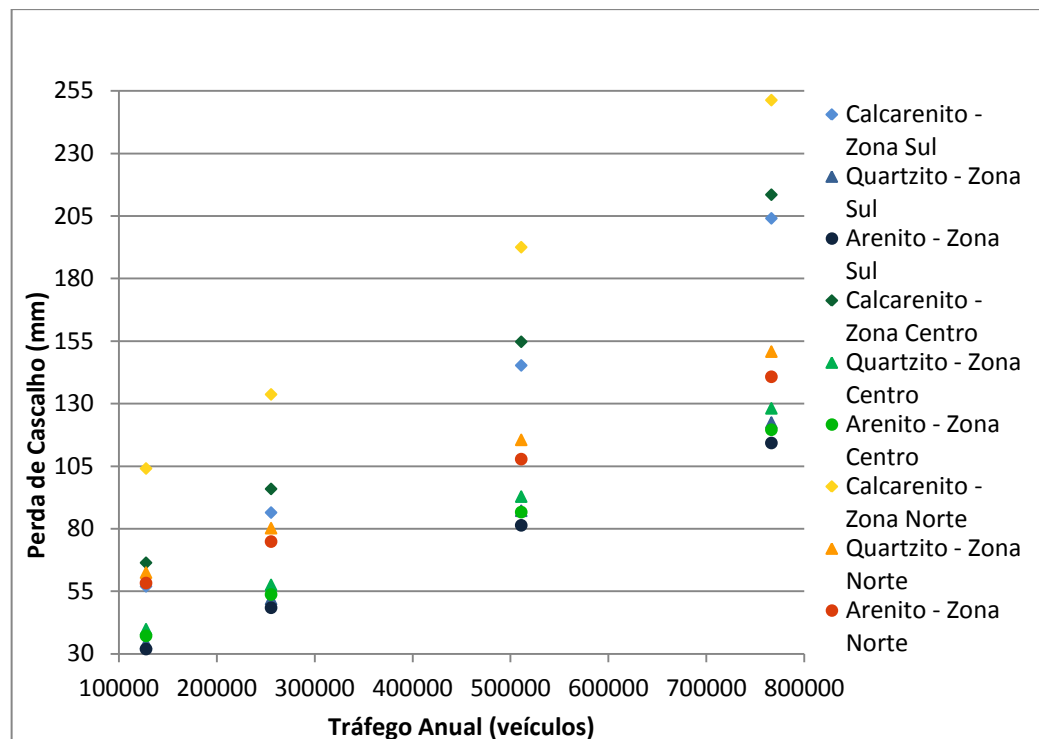


Fig. 4.6 - Relação entre o tráfego e a perda de cascalho nas três zonas com base no TRL (2003)

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. CONCLUSÕES

Este capítulo resume as principais conclusões da pesquisa desenvolvida nesta dissertação, mais concretamente na procura de métodos de dimensionamento e de previsão do comportamento, e da aplicação desses métodos a Portugal.

Os métodos de avaliação de danos, no geral, são específicos para cada país visto que são determinados para colmatar os problemas aí existentes. Os problemas encontrados carecem muitas vezes de avaliação e inspeção no local para que as soluções a adotar para resolver o problema sejam as mais adequadas. No entanto, para problemas que ocorrem com mais frequência, como a formação de poeira, perda de material, formação de covas e rugosidades, existem métodos que permitem efetuar estimativas para determinados períodos para que, posteriormente se possa estimar a quantidade de material que necessita de ser reposta e a frequência necessária para a manutenção.

Da análise da aplicação dos métodos para determinação da espessura de cascalho, concluiu-se que os resultados obtidos podem variar muito, em particular em função do volume de tráfego. Para além disso, é muito distinta a forma como as características dos materiais são contempladas nos diversos métodos. Alguns deles fazem uso explicitamente das características mecânicas do material utilizado na camada de desgaste.

Relativamente à perda de cascalho, concluiu-se que ela varia muito com o tráfego, mas também de forma importante com a pluviosidade e com o tipo de material. Estes cálculos são importantes para estimar a quantidade de material que será reposto na superfície da estrada, programar as intervenções de recarga, e analisar a viabilidade económica destas infraestruturas.

Com os estudos apresentados, pretendeu-se evidenciar que é necessário desenvolver metodologias que possam ser utilizadas para o caso de Portugal, mais especificamente para a determinação de espessuras de camadas de superfície e avaliação de danos nas mesmas.

5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A pesquisa realizada permitiu concluir que é possível alargar os conhecimentos relativos ao dimensionamento e manutenção de estradas não pavimentadas.

É importante continuar a avaliar e investigar os problemas que ocorrem nas estradas não pavimentadas com o objetivo de desenvolver métodos mais consistentes, visto que, em alguns casos, os métodos apenas são aplicáveis nos próprios países.

Seria interessante desenvolver métodos de dimensionamento e de avaliação de danos de estradas não pavimentadas que contemplassem as especificidades de Portugal, atendendo às características climáticas e aos materiais disponíveis. Dentro destes, seria interessante avaliar quais os parâmetros geotécnicos que mais influenciam o desempenho dos materiais.

Para além do já referido, uma área a explorar é aquela que trata da utilização de solos estabilizados com ligantes não tradicionais, nas camadas de desgaste de estradas não pavimentadas. Estudos de formulação que contemplem a diversidade de ligantes que existe e a realização de trechos piloto com este tipo de materiais, constituem-se como importantes desafios.

BIBLIOGRAFIA

- Aho, S., Saarenketo, T., (2006). *Design and Repair of Roads Surfacing Spring Thaw Weakening*. Roadex III Project, Swedish Road Administration, Lulea.
- Aimil, (2011). [http://www.aimil.com/product/California_Bearing_Ratio_Test_Apparatus,_Laboratory_Type_\(AIM_120,_AIM_120_MS,_AIM_121,_AIM_121_1\)_Ref_Std__IS_9669,_IS_2720_\(Part_16\)-426.aspx](http://www.aimil.com/product/California_Bearing_Ratio_Test_Apparatus,_Laboratory_Type_(AIM_120,_AIM_120_MS,_AIM_121,_AIM_121_1)_Ref_Std__IS_9669,_IS_2720_(Part_16)-426.aspx). 28 de Maio de 2013
- Betoteste, (2009). <http://www.betoteste.pt/carga-em-placa.html>. 28 de Maio de 2013
- Brito, L. A. T., (2011). *Design Methods for Low Volume Roads*. Dissertação de Doutoramento, Universidade de Nottingham.
- Colorado State Forest Service, (2011). *Colorado Forest Road Field Handbook*. Colorado State Forest Service; Colorado State University; Fort Collins, CO.
- Department of Transport (DOT), (2009). *Unsealed Roads: Design, Construction and Maintenance*. Pretoria: Department of Transport. (Draft TRH 20).
- Du Plessis, L. Paige-Green, P., *The use and interpretations of the dynamic cone penetrometer (DCP) test*. http://researchspace.csir.co.za/dspace/bitstream/10204/3692/1/Paige-Green_2009.pdf
- Eaton, R. A.; Gerard, S.; Dattilo, R. S. (1987). *A Method for Rating Unsurfaced Roads*. Transportation Research Record.
- Evans, G. (2005). *Design Manual for Low Cost Rural Roads in Romania*. International Bank for Reconstruction and Development (IBRD), NW Washington DC 20037, USA.
- Fairbrother, S., (2011). *Improved Pavement Design for Aggregate Surfaced Roads*. Low Volume Roads Workshop, Queenstown. http://www.reaaa.co.nz/publication/improved-design-method-for-aggregate-surfaced-roads-%E2%80%93-simon-fairbrother-university-of-canterbury/wppa_open/. 10 de Junho de 2013
- Federal Highway Administration (FHWA), (2000). *Gravel Roads – Maintenance and Design Manual*. U.S. Department of Transportation, South Dakota.
- Ferreira, F. M. (2004). *Uma aplicação comparativa de métodos de avaliação das condições superficiais de estrada não-pavimentada*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas.
- Fortunato, E. (2012). *Aulas de Obras de Aterro*. FEUP, Porto.
- Fortunato, E., Alves, E., Antunes, M. L., Freire, A. C. (2013). *Curso de Estradas de Baixo Volume de Tráfego*. LNEC, Lisboa.
- FSL, 2008. http://www.fsl.orst.edu/geowater/FX3/case/dry_creek/imgs/dry_creek4LG.jpg. 27 de Maio de 2013
- Jones, D., Paige-Green, P. (2000). *Pavement Management System: Standard Visual Assessment Manual for Unsealed Roads (Version1)*. Pretoria: Department of Transport. (Draft TMH12).
- Jones, T E. (1984). *The Kenya maintenance study on unpaved roads: Research on Deterioration*. Department of the Environment Department of Transport, TRRL Laboratory Report 1111 (Transport and Road Research Laboratory), Crowthorne.

Jornal da Cidade de Rio Claro, 2012.<http://jornalcidade.uol.com.br/rioclaro/municipios/santa-gertrudes/105545-DER-assina-convenio-com-SantaGertrudes>. 6 de Junho de 2013

Kestler, M. A. (2009). *Stabilization Selection Guide for Aggregate and Native-Surfaced Low Volume Roads*. National Technology & Development Program, U.K.

Matos Fernandes, M. (2011). *Mecânica dos Solos – Volume II, Introdução à Engenharia Geotécnica*. FEUP Edições, Porto.

Oda, S. (1995). *Caracterização de uma rede municipal de estradas não-pavimentadas*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo.

Pereira, T. C. (2010). *Uma contribuição para a determinação de propriedades físicas e mecânicas de materiais granulares compactos, com recurso a Penetrómetro Dinâmico Ligeiro*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Roadex (2013). <http://www.roadex.org/>. 17 de Junho de 2013

Ryan, T., Phillips, H., Ramsay, J. and Dempsey, J. 2004. *Forest Road Manual. Guidelines for the design, construction and management of forest roads*. COFORD, Dublin.

Transport Research Laboratory (TRL) (1999). *A guide to the pavement evaluation and maintenance of bitumen-surfaced roads in tropical and sub-tropical*. Overseas Road Note 18. Transport Research Laboratory, Crowthorne.

TRL & Intech Associates (TRL) (2003). *Rural Road Surfacing, Surface Options – Gravel*. PIARC, UK.

Highway Research Board (1962). http://classes.engr.oregonstate.edu/cce/winter2012/ce492/Modules/09_pavement_evaluation/09-2_body.htm. 16 de Maio de 2013.

Van Zyl, G., Henderson, M., Uys, R. (2007). *Applicability of Existing Gravel-Road Deterioration Models Questioned*. Transport Research Board of the National Academies, Washington, D.C..

<http://library.modot.mo.gov/RDT/reports/Ri06003/or06017.pdf>. 16 de Maio de 2013.

http://www.worldbank.org/transport/roads/rd_tools/hdm3.htm. 11 de Junho 2013

http://www.worldbank.org/transport/roads/rd_tools/hdm4.htm. 11 de Junho de 2013

ANEXOS

ANEXO I

Quadro I.1 - Determinação da espessura da camada de cascalho com base no TRL (2003)

MÉTODO PROPOSTO PELO TRL (2003)			
	CBR in situ da fundação - CBR (%)	Nº de eixos equivalentes - NE	Espessura de Cascalho - HG (mm)
Fundação Tipo 1	7	15	222
		30	239
		60	255
		90	265
Fundação Tipo 2	10	15	177
		30	191
		60	204
		90	212
Fundação Tipo 3	12	15	158
		30	170
		60	182
		90	189

Quadro I.2 - Determinação da espessura da camada de cascalho com base no método proposto por Hammitt (1970) e posteriormente Barber, Odom e Patrick (1978) para a fundação tipo 1 (CBR=7)

MÉTODO PROPOSTO POR HAMMITT (1970)			
	CBR do material de superfície - C1 (%)	Nº de eixos equivalentes - NE	Espessura de Cascalho - HG (mm)
Material 1	30	15	190
		30	228
		60	278
		90	315
Material 2	40	15	148
		30	173
		60	206
		90	229
Material 3	50	15	124
		30	143
		60	167
		90	184

Quadro I.3 - Determinação da espessura da camada de cascalho com base no método proposto por Hammitt (1970) e posteriormente Barber, Odom e Patrick (1978) para a fundação tipo 2 (CBR=10)

MÉTODO PROPOSTO POR HAMMITT (1970)			
	CBR do material de superfície - C1 (%)	Nº de eixos equivalentes - NE	Espessura de Cascalho - HG (mm)
Material 1	30	15	172
		30	205
		60	247
		90	278
Material 2	40	15	135
		30	157
		60	185
		90	205
Material 3	50	15	114
		30	131
		60	152
		90	167

Quadro I.4 - Determinação da espessura da camada de cascalho com base no método proposto por Hammitt (1970) e posteriormente Barber, Odom e Patrick (1978) para a fundação tipo 3 (CBR=12)

MÉTODO PROPOSTO POR HAMMITT (1970)			
	CBR do material de superfície - C1 (%)	Nº de eixos equivalentes - NE	Espessura de Cascalho - HG (mm)
Material 1	30	15	164
		30	194
		60	233
		90	261
Material 2	40	15	129
		30	150
		60	176
		90	195
Material 3	50	15	110
		30	126
		60	145
		90	159

Quadro I.5 - Determinação da profundidade da cova com base no método proposto por Jones para os três materiais (1984)

MATERIAL 1 (CASCALHO CALCÁRIO)		
Fluxo do Tráfego Anual - TA	Tipo de Material - f	Prof. da Cova - RD (mm)
18250	2,50	Não tem informação
36500	2,50	
73000	2,50	
109500	2,50	
MATERIAL 2 (CASCALHO QUARTZÍTICO)		
Fluxo do Tráfego Anual - TA	Tipo de Material - f	Prof. da Cova - RD (mm)
18250	1,50	15
36500	1,50	28
73000	1,50	60
109500	1,50	76
MATERIAL 3 (CASCALHO ARENÍTICO)		
Fluxo do Tráfego Anual - TA	Tipo de Material - f	Prof. da Cova - RD (mm)
18250	1,40	15
36500	1,40	23
73000	1,40	74
109500	1,40	231

Quadro I.6 - Determinação da perda de cascalho com base TRH 20 para os três materiais (DOT, 2009)

MATERIAL 1 (LIMITE DE PLASTICIDADE=10)			
Tráfego Médio Diário - ADT	Coefficiente de plasticidade - PF	% passada no peneiro 26,5 - P26	Perda de Cascalho - GL (mm)
50	100	80	78
100	100	80	109
200	100	80	172
300	100	80	234

MATERIAL 2 (LIMITE DE PLASTICIDADE=14)			
Tráfego Médio Diário - ADT	Coefficiente de plasticidade - PF	% passada no peneiro 26,5 - P26	Perda de Cascalho - GL (mm)
50	210	87	77
100	210	87	103
200	210	87	155
300	210	87	207

MATERIAL 3 (LIMITE DE PLASTICIDADE=30)			
Tráfego Médio Diário - ADT	Coefficiente de plasticidade - PF	% passada no peneiro 26,5 - P26	Perda de Cascalho - GL (mm)
50	600	93	66
100	600	93	87
200	600	93	130
300	600	93	172

Quadro I.7 - Determinação da perda de cascalho no material 1 (f=2,50) com base TRL

MATERIAL 1 (CASCALHO CALCÁRIO)				
	Tráfego Médio Diário - ADT	Fluxo do Tráfego Anual - TA	Precipitação anual - RF (mm)	Perda de Cascalho - GLA (mm)
SUL	50	127750	600	57
	100	255500	600	86
	200	511000	600	145
	300	766500	600	204
CENTRO	50	127750	1200	66
	100	255500	1200	96
	200	511000	1200	155
	300	766500	1200	213
NORTE	50	127750	2400	104
	100	255500	2400	134
	200	511000	2400	192
	300	766500	2400	251

Quadro I.8 - Determinação da perda de cascalho no material 2 ($f=1,50$) com base TRL

MATERIAL 2 (CASALHO QUARTZÍTICO)				
	Tráfego Médio Diário - ADT	Fluxo do Tráfego Anual - TA	Precipitação anual - RF (mm)	Perda de Cascalho - GLA (mm)
SUL	50	127750	600	34
	100	255500	600	52
	200	511000	600	87
	300	766500	600	122
CENTRO	50	127750	1200	40
	100	255500	1200	58
	200	511000	1200	93
	300	766500	1200	128
NORTE	50	127750	2400	62
	100	255500	2400	80
	200	511000	2400	115
	300	766500	2400	151

Quadro I.9 - Determinação da perda de cascalho no material 3 ($f=1,40$) com base TRL

MATERIAL 3 (CASALHO ARENÍTICO)				
	Tráfego Médio Diário - ADT	Fluxo do Tráfego Anual - TA	Precipitação anual - RF (mm)	Perda de Cascalho - GLA (mm)
SUL	50	127750	600	32
	100	255500	600	48
	200	511000	600	81
	300	766500	600	114
CENTRO	50	127750	1200	37
	100	255500	1200	54
	200	511000	1200	87
	300	766500	1200	120
NORTE	50	127750	2400	58
	100	255500	2400	75
	200	511000	2400	108
	300	766500	2400	141